

Jani Räisänen

**KARKEAMURSKAIMEN AKSELIN KUNNON MITTAAMINEN  
AINETTA RIKKOMATTOMILLA MENETELMILLÄ**

Insinöörityö  
Kajaanin ammattikorkeakoulu  
Tekniikan ja liikenteen ala  
Kone- ja tuotantotekniikka  
Kevät 2013

Koulutusala Tekniikka ja liikenne	Koulutusohjelma Kone- ja tuotantotekniikka
Tekijä Jani Räisänen	
Työn nimi Karkeamurskaimen akselin kunnan mittaaminen ainetta rikkomattomilla menetelmillä	
Vaihtoehtoiset ammattiopinnot Tuotannon johtaminen Kaivannaistekniikka	Ohjaaja Lehtori Mikko Heikkinen  Toimeksiantaja Juho Torvi/Devico-projekti
Aika Kevät 2013	Sivumäärä ja liitteet 45
<p>Insinööritöä tehtiin TEKES:n rahoittamalle Devico-projektille, joka kehittää pienten ja keski suurien kaivoksien kunnossapitomenetelmiä. Insinööritöissä tutkittiin yleisimpiä eri ainetta rikkomattomia tarkastusmenetelmiä ja niiden toimintaperiaatteita. Insinööritöissä syvennettiin tarkemmin ultraääneen ja ultraäänitarkastukseen ja siihen liittyviin eri laitteisiin. Lisäksi toteutettiin mittaustapahtuma yhdessä DEKRA Industrial Oy:n kanssa Talvivaaran kaivoksen kaivosvarikolla. Mittaustapahtumassa tarkastettiin malmin tuotannon karkeamurskaimen akselia silmämääräisesti ja magneettijauhe- ja ultraäänitarkastuksen avulla.</p> <p>Mittaustapahtuman johtopäätöksiä olivat, että mittauksen vaatimien olosuhteiden täytyy olla stabiilit, jotta saadaan aikaan luotettavia ja vertailukelpoisia mittaustuloksia. Myös oikeanlaiset kalibroidut mittauslaitteet ja -välineet ovat oleellinen osa ainetta rikkomattomaa tarkastusmittausta. Tärkein asia on ammattitaitoinen ja asiantunteva mittaaja tai yritys, jolla on tietotaito toteuttaa vaativia ainetta rikkomattomia tarkastusmittauksia, joita tulee tehdä säännöllisesti. Näin mittaustuloksien historiasta saadaan luotettavaa ja vertailukelpoista. Jatkossa ultraäänitarkastusta voitaisiin käyttää myös muissa Talvivaaran kaivoksen kohteissa, esimerkiksi kiviautojen runkojen ja kaivinkoneen puomien tarkastuksessa.</p> <p>Myös mahdollisten vakavien akselivaurioiden tutkimiseen voitaisiin käyttää vaurioanalyysia, jonka avulla tutkittaisiin vaurio ja saataisiin viitteitä vaurion todellisesta aiheuttajasta. Tämän avulla voidaan säästää rahaa ja kustannuksia, kun ennaltaehkäistään tulevaisuudessa tapahtuvat akselivauriot ja ennakoimattomat tuotantoseisokit.</p>	
Kieli	Suomi
Asiasanat	NDT, ultraääni, akseli, kaivos
Säilytyspaikka	<input checked="" type="checkbox"/> Verkkokirjasto Theseus <input checked="" type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun kirjasto

School Engineering	Degree Programme Mechanical and Production Engineering
Author Jani Räisänen	
Title Measurement of Crusher Shaft Condition by Non Destructive Testing Methods	
Optional Professional Studies Production Leadership Mining Technology	Instructor Mr. Mikko Heikkinen
	Commissioned by Juho Torvi/Devico-Project
Date Spring 2013	Total Number of Pages and Appendices 45
<p>The thesis was made for the Devico-project which is funded by TEKES, the Finnish Funding Agency for Technology and Innovation. The project develops maintenance methods for small and medium-sized mines. In the thesis the most common of different non-destructive testing methods and their operating principles were investigated. Ultrasound, ultrasound inspection and the associated devices were explored more specifically. Also, measurements were carried out together with the DEKRA Industrial Ltd at the Talvivaara Mining mine area. In the measurement a crusher shaft was inspected visually, as well as using magnetic particle and ultrasonic methods.</p> <p>The conclusions were that the conditions during the measurements need to be stable in order to obtain reliable and comparable test results. In addition, the right kind of calibrated equipment and instruments are an important part of the non-destructive testing measurement. The most important thing is the professional and expert measurer or a company with know-how to implement demanding non-destructive testing which should be made on a regular basis. Thus, the history of the results can be regarded as more reliable and comparable. In the future ultrasonic testing could also be used in other Talvivaara mine targets, such as rigid dump trucks bodies and excavator beams inspection.</p> <p>The final conclusion was that in the case of severe fault to the crusher shaft a damage analysis could be made. The analysis provides information of the damage and the real cause. Thus, any possible future shaft fault could be prevented and unexpected downtime avoided, as well as money saved.</p>	
Language of Thesis      Finnish	
Keywords	NDT, ultrasound, shaft, mine
Deposited at	<input checked="" type="checkbox"/> Electronic library Theseus <input checked="" type="checkbox"/> Library of Kajaani University of Applied Sciences

## SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 TALVIVAARAN KAIVOS	2
2.1 Malmin tuotanto	2
2.2 Metallien talteenotto	4
3 TALVIVAARAN KARKEAMURSKAAMO	5
3.1 Karkeamurskaimen kunnossapito	5
3.2 Akselin kunnan mittaaminen	7
4 AINETTA RIKKOMATTOMAT TARKASTUSMENETELMÄT	9
4.1 Visuaaliset tarkastusmenetelmät	10
4.1.1 Silmämääräinen	10
4.1.2 Endoskopia	10
4.1.3 Stroboskopia	11
4.2 Pintatarkastusmenetelmät	11
4.2.1 Magneettijauhetarkastus	11
4.2.2 Tunkeumanestetarkastus	12
4.2.3 Pyörrevirtatarkastus	13
4.2.4 Jäljennetarkastus	14
4.3 Volymetriset menetelmät	15
4.3.1 Radiografia	15
4.3.2 Röntgenkuvaus	16
4.3.3 Ultraääni	17
4.4 Akustinen emissio	18
4.5 Barkhausen kohinamittaus	18
4.6 Moodianalyysi	20
4.7 Yhteenvedo NDT-menetelmistä	21

5 MITTAUSMENETELMÄN VALINTA	22
5.1 Ultraäänitarkastus	25
5.2 Ultraäänilaitteita UT-mittaukseen	28
5.2.1 DryScan 410D	28
5.2.2 EPOCH 1000	29
5.2.3 Kalibrointikappale ja luotain	30
5.3 NDT-tarkastajat	31
6 KARKEAMURSKAIMEN AKSELIN MITTAAMINEN	32
6.1 Yrityksen esittely	32
6.2 Mittauksiin käytetyt laitteet	32
6.3 Mittauksen kulku	34
7 MITTAUSTULOKSET	39
8 JOHTOPÄÄTÖKSET	41
9 YHTEENVETO	43
LÄHTEET	44

## LYHENTEIDEN JA SANOJEN SELITYKSET

Absorptio	Aineen imeytyminen toisen aineen sisään
AEL	Ammattienedistämislaitos
DEVICO	Development of production integrated condition-based maintenance model for mining industry
DT	Ainetta rikkova tarkastusmenetelmä (destructive testing)
EN-standardi	European Standard
Hermeettinen	Ilmatiivisti suljettu
NDT	Ainetta rikkomattomat tarkastusmenetelmät (non destructive testing)
VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus

## 1 JOHDANTO

Tämän insinööriyön aiheena on karkeamurskaimen akselin kunnon mittaaminen ainetta rikkomattomien tarkastusmenetelmien avulla. Työn tavoitteena on löytää ratkaisu karkeamurskaimen akselin rakenteen epäjatkuvuuskohtien löytämiseen, kuten säröjen, halkeamien, korroosio- ja väsymisvaurioiden havaitsemiseen suuresta kappaleesta.

Kunnossapidon kannalta aihe on erittäin ajankohtainen, koska Suomessa kunnossapidon kehitys on jäämässä kansainvälisen kunnossapidon kehityksestä. Suomen teollisuuden laitteet ovat iältään jo keskimääräisesti 19,05 vuotta ja kansantaloudellisesti kunnossapitoon käytetään noin 24 miljardia euroa, josta teollisuuden osuus on jopa 3,5 miljardia euroa. Kunnossapidon kehittäminen ja sen tehostaminen on olennainen asia, johon tulisi tulevaisuudessa panostaa. [1, s. 31–32.]

Kunnossapidosta pitäisikin tulla jokaisen henkilökohtainen asia, koska jokainen omalta osaltaan on kehittämässä ja huolehtimassa tuotannon laitteista. Näin saataisiin tehostettua kunnossapitoajattelua ja kehitettyä kunnossapidon eri toimintoja. Tehostamalla ennakoivaa kunnossapitoa ja siihen liittyviä eri toimintoja, esimerkiksi mittaava kunnossapito, säästetään tulevaisuudessa selvää rahaa. Muuttamalla vanhentuneita asenteita kunnossapitoa kohtaan ja keskittämällä voimia ennalta ehkäisevään kunnossapitoon ja olemalla avoimia uusille mahdollisille menetelmille ja ajattelumalleille voi Suomesta tulla kunnossapitoinnovaatioiden uusi lähde.

Tekesin rahoittamassa Devico-projektissa onkin pyritty rikkomaan vanhoja käsityksiä ja avaamaan uusia mahdollisuuksia uusille tai alkaville kaivoksille. Devico-projekti tutkii kunnossapidon prosesseja kaivosteollisuudessa ja kehittää kaivosten elinkaaren huomioon ottavan kunnossapidon toimintamallin, jonka kaivokset voivat ottaa helposti ja nopeasti käyttöön. Toimintamalli ottaa huomioon kaivostoiminnan erityispiirteet, kuten malmivarannoista riippuvan elinkaaren, kovat ympäristölliset olosuhteet sekä kunnossapidon ympäristövaikutukset. Tämä insinööriyö on osa Devico-projektia. [2, s. 43.][3.]

Insinööriyössä tutkitaan erilaisia ainetta rikkomattomia tarkastusmenetelmiä eli NDT-menetelmiä suuren kappaleen epäjatkuvuuskohtien löytämiseksi. Sopivan mittausmenetelmän avulla toteutetaan karkeamurskaimen akselin mittaus yhteistyössä mittaavan yrityksen kanssa ja dokumentoidaan mittaustapahtuma.

## 2 TALVIVAARAN KAIVOS

Kainuun Sotkamon kunnassa sijaitseva Talvivaaran kaivos on Euroopan suurin nikkeli-kaivos ja merkittävimpiä perusmetallien tuottajia maailmassa. Talvivaara Kaivososakeyhtiö Oy:n ensisijaiset tuotteet ovat nikkeli ja sinkki, mutta sivutuotteena kaivos tuottaa myös kuparia ja pieniä määriä kobolttia ja uraania. Talvivaaran kaivokselta tulevat tuotteet ovat metallipuoli-tuotteita eli metallisulfideja. Nikkelisulfidi kuljetetaan jatkojalostukseen Harjavaltaan Norilsk Nickels Oy:n jalostamolle ja sinkkisulfidi Nyrstarille, joiden kanssa Talvivaaralla on pitkäaikaiset sopimukset rikasteiden toimittamisesta. [4,5,6.]

Talvivaaran kaivos käyttää metallien irrottamiseen malmista bioliuotusmenetelmää, jota ei ole ennen käytetty Suomessa. Menetelmässä malmissa olevat metallit bioliuotetaan irti laimean rikkihapon, ilman ja bakteerien avulla. Bioliuotus on talouskustannuksiltaan edullinen menetelmä, jolla saadaan talteen malmissa pieninä pitoisuuksina olevat metallit. Talvivaaran kaivoksella tuotanto on jaettu kahteen suurempaan kokonaisuuteen: malmin tuotantoon ja metallien talteenottoon. Seuraavassa kahdessa luvussa kerrotaan tarkemmin Talvivaaran kaivoksen tuotantoprosessista ja -menetelmistä. [4,5.]

### 2.1 Malmin tuotanto

Talvivaaran malmi louhitaan Kuusilammen avolouhoksesta, joka on toinen Talvivaarassa olevista malmiesiintymistä. Kolmisopen malmiesiintymää tullaan käyttämään samaan aikaan kuin Kuusilammen avolouhostakin. Malmi louhitaan Kuusilammen avolouhoksesta porauspanostusmenetelmällä, räjäyttämällä jopa 300 000 tonnin suuruisia kenttiä yhdellä kertaa. Louhintatavoitteeksi vuonna 2012 Talvivaaran kaivos oli asettanut 18 miljoonaa tonnia malmia, ja lisäksi louhitaan 12 miljoonaa tonnia sivukiveä, josta suurin osa käytetään sekundärilentien rakenteisiin. Myöhemmässä vaiheessa sivukivellä on oma läjitysalueensa. [4.]

Louhittu malmi kuljetetaan kiviautoilla louhokselta murskattavaksi karkeamurskaamoon. Karkeamurskaamossa malmilohkareet (<800 mm) murskataan karkeamurskaimella pienempään partikkelikokoon jatkoprosessien vaatimusten takia. Karkeamurskain on tyypiltään karkeamurskain, joka on tyypillisesti ensimmäinen murskain suurilla kaivoksilla. Talvivaaran kaivoksella ei ole käytössä kuin yksi karkeamurskain, joten sen kunnossapito on erittäin tärkeä.



Karkeamurskaimen ennakkohuolto ja kunnonvalvonta on jatkotuotannon kannalta merkittävää, koska karkeamurskaimen rikkoutuessa pysähtyy malmintuotanto. [4,5.]

Karkeamurskaamolta murskattu malmi (<165 mm) kuljetetaan kolme kilometriä pitkällä hihnakuljettimella välivarastoon, jossa on murskattua malmia noin 8 tunnin (20 000 t) tuotannon tarve. Sieltä malmi siirretään kuljettimella sekundäärimurskaukseen. Sekundäärimurskauksessa malmi murskataan noin 60 mm partikkelikokoon. Murskattu malmi kuljetetaan seulomoon, josta alite menee agglomerointiin, mutta ylite kuljetetaan hienomurskaukseen. Hienomurskaamon ja seulomon välillä on ”hullunkierro”. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että ylite kiertää niin kauan, että kaikki malmi menee alitteeseen ja agglomerointiin. Hienomurskaimet ovat tyypiltään Sandvikin karamurskaimia. Seulonnan ja hienomurskaimien avulla tavoitepartikkelikooksi saadaan 8 mm. [4.]

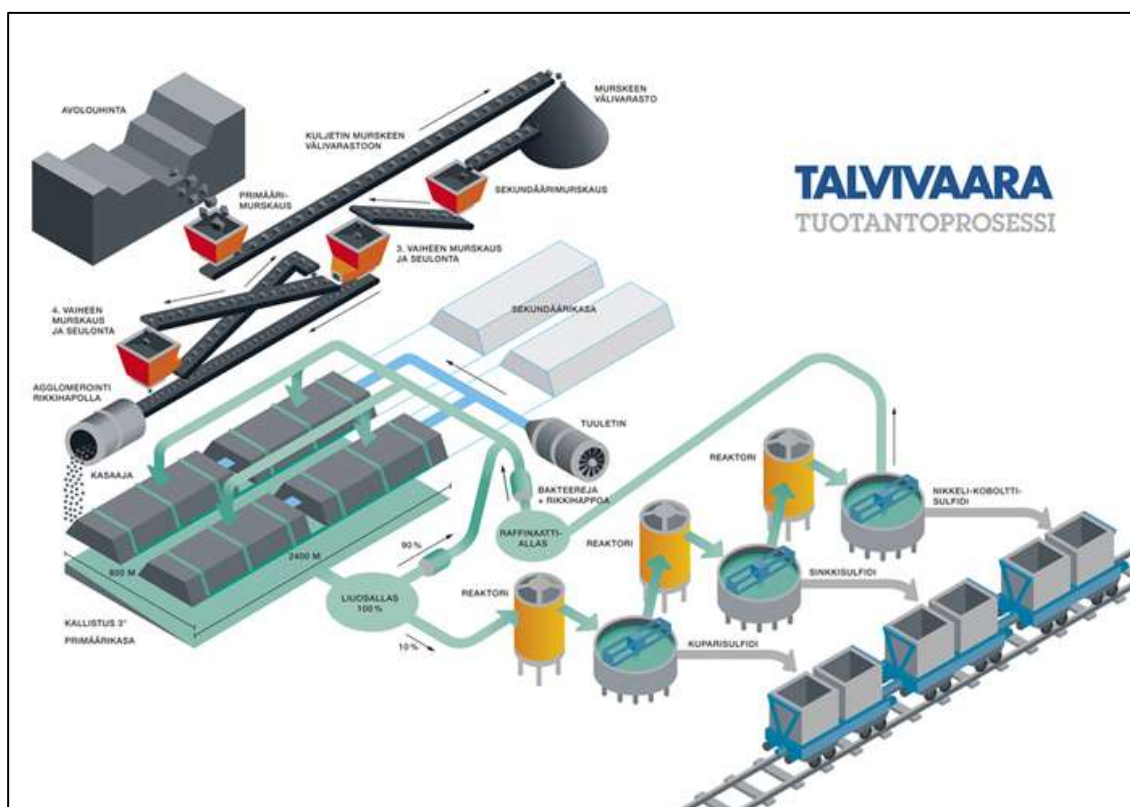
Agglomeroinnissa eli rakeistuksessa murskattuun malmiin lisätään laimeaa rikkihappoa, jotta hienoinen saataisiin tarttumaan paremmin karkeampaan materiaaliin. Agglomeroinnissa murskattua malmia pyöritetään isoissa lieriömuotoisissa rummuissa, jotta murskatusta malmista saataisiin sopivan kokoisia rakeita (8 mm). Tasalaatuisella raekoolla saadaan seuraavassa prosessivaiheessa tasalaatuisemmat liuotuskasat. Kun liuotuskasoissa olevat partikkelit ovat samankokoisia, niin ilma ja kiertoliuos saadaan paremmin kasan sisään ja näin päästään tehokkaampaan liuotustulokseen. [4.]

Agglomeroinnista malmi kuljetetaan kuljetushihnojen avulla bioliuotuskasalle, jossa siitä aletaan liuottaa malmia kiertoliuoksen, ilman ja bakteerien avulla. Talvivaaran kaivoksella on tällä hetkellä neljä kappaletta bioliuotuskasojia, jotka ovat kooltaan 8 m x 400 m x 1200 m. Malmia liuotetaan kasoissa noin puolentoista vuoden ajan, jonka jälkeen malmi siirretään kuljettimien avulla sekundäärikasalle. Bioliuotusta jatketaan sekundäärikasoilla, ja joka on malmin lopullinen sijoituspaikka. Kun sekundäärikasoista ei saada enää malmia talteen, maisemoidaan ne asianmukaisin keinoin. [4.]

## 2.2 Metallien talteenotto

Bioliuoskasoja kastellaan kiertoliuoksella koko kasan olemassa olon ajan. Samalla kasaan puhalletaan ilmaa, jolloin yhdessä bakteerien avulla malmissa oleva metalli irtaantuu kiertonesteeseen. Kiertoneste kerätään isoihin liuosaltaisiin. Kun kiertoliuoksen metallipitoisuus on tarpeeksi suuri, otetaan liuoksen virrasta 10 % metallien talteenottoon. [4.]

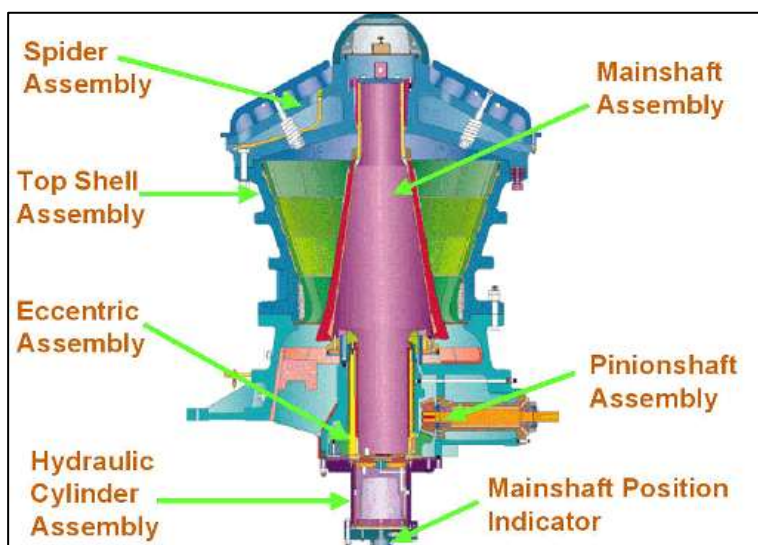
Metallien talteenotossa liuoksesta otetaan talteen eri metallisulfideja eri prosessin vaiheissa. Nämä eri metallisulfidit käsitellään asianmukaisin keinoin, jotta ne ovat kuljetusvalmiita edelleen jatkojalostukseen. Jäljelle jäänyt liuos palautetaan takaisin bioliuotuskiertoon, jolloin saadaan talteen mahdollisesti liuokseen vielä jääneet metallit. Kuvassa 1 on esitetty periaate Talvivaaran kaivoksen koko tuotantoprosessissa. [4.]



Kuva 1. Talvivaaran kaivoksen tuotantoprosessi. [4.]

### 3 TALVIVAARAN KARKEAMURSKAAMO

Talvivaaran kaivoksen yksi kriittisimmistä tuotannon kohdista on primääri- eli karkeamurskaamo. Karkeamurskaamossa murskataan louhokselta tulevaa malmia pienemmiksi partikkeleiksi. Louhokselta tuleva murske on kooltaan alle metristä lohkarettä, joka murskataan karkeamurskaimella. Karkeamurskaamon murskain on Gyratory-tyyppinen karamurskain. Kuva 2 on esitetty Gyratory-tyyppisen karamurskaimen periaatekuva. [6.]



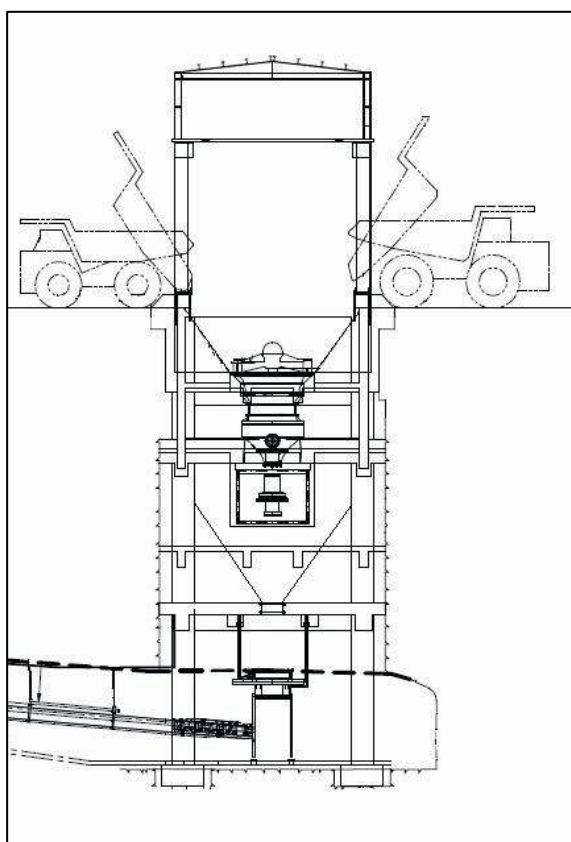
Kuva 2. Gyratory-tyyppinen karamurskain. [7.]

#### 3.1 Karkeamurskaimen kunnossapito

Karkeamurskaamo on erittäin kriittinen tuotantovaihe koko Talvivaaran prosessille. Tämän takia karkeamurskaamon ja karkeamurskaimen kunnossapito on elintärkeää kaivoksen tasaiselle tuotannolle. Karkeamurskaimelle tuleva seisokki vaikuttaa heti seuraaviin tuotannon vaiheisiin ja myös louhokselle. Näin varaosien saatavuus ja karkeamurskaimen akselin huolto on erityisen tärkeä karkeamurskaamon toiminnalle. [6.]

Karkeamurskaimen akselin vikaantuessa sen toimitusaika voi olla pahimmassa tapauksessa kuukausia tai jopa vuosi. Siksi vara-akselien ja käytössä olevan akselin mittaaminen mahdollisten vikojen takia on erityisen tärkeää. Mittaamalla akselit mahdollisten epäjatkuvuuskohtien löytämiseksi pystytään ennakoimaan mahdolliset korjaustarpeet ajoissa ja tekemään tarvittavat toimenpiteet toiminnan jatkamiselle.

Karkeamurskaimen on valmistanut FLSmidth Minerals USA Incorporation. Se on tyypiltään Traylor NT -karamurskain. Murskain on korkeudeltaan 8897 mm, ja sen kokonaishalkaisija on 5890 mm. Karkeamurskaimen läpi voidaan ajaa 4000 tonnia malmia tunnissa, ja ajon aikana murskaimen vaipoissa voi olla noin 75 tonnia malmia suojaamassa vaippoja liialliselta kulumiselta. Kokonaispainoa karkeamurskaimella on 325 tonnia, ja yksistään murskaimen akseli painaa noin 28 tonnia. Näin ollen on erityisen tärkeää, että karkeamurskaimen akselin täytyy olla hyvässä kunnossa. Karkeamurskain on sijoitettu suureen halliin, joka on louhittu osaksi kallion sisään. Kuvassa 3 on esitetty periaatekuva karkeamurskaamosta ja karkeamurskaimen sijainnista. [8.]



Kuva 3. Talvivaaran Oy:n karkeamurskaamo. [9.]

Karkeamurskaimen mantteli vaihdetaan noin kolmen kuukauden välein. Mantteli on karkeamurskaimen akselin ja rungon suojakuori, jossa ovat kiinni murskaimen kulutuspalat. Kulutuspalojen kuluessa loppuun täytyy ne vaihtaa määräaikaishuolloissa. Samalla vaihdetaan myös murskaimen akseli vara-akseliin. Vara-akseliin on laitettu valmiiksi mantteli huollon nopeuttamiseksi.

Karkeamurskaimen akseleita on käytettävissä kolme kappaletta, joista kahta huolletaan yhden ollessa käytössä. Tämä ajankohta olisi erittäin hyvä karkeamurskaimessa olleen akselin kun-

non mittaamiseen. Näin saataisiin heti tietoa akselissa mahdollisesti olevista epäjatkuvuus- kohdista ja voitaisiin tehdä siten tarvittavat toimenpiteet. Jos jostain syystä epäillään vikaa akselissa jo käynnin aikana, on sen mittaaminen mahdollista pienessä seisokissa ottamalla akselin päällä oleva suojakupu pois. Mittaus voitaisiin suorittaa myös muissa erilaisissa seisokeissa ja pysäytystilanteista. Kuvassa 4 on esitetty karkeamurskaimen akseli ja mantteli. [6.]



Kuva 4. Karkeamurskaimen akseli ja mantteli. [10.]

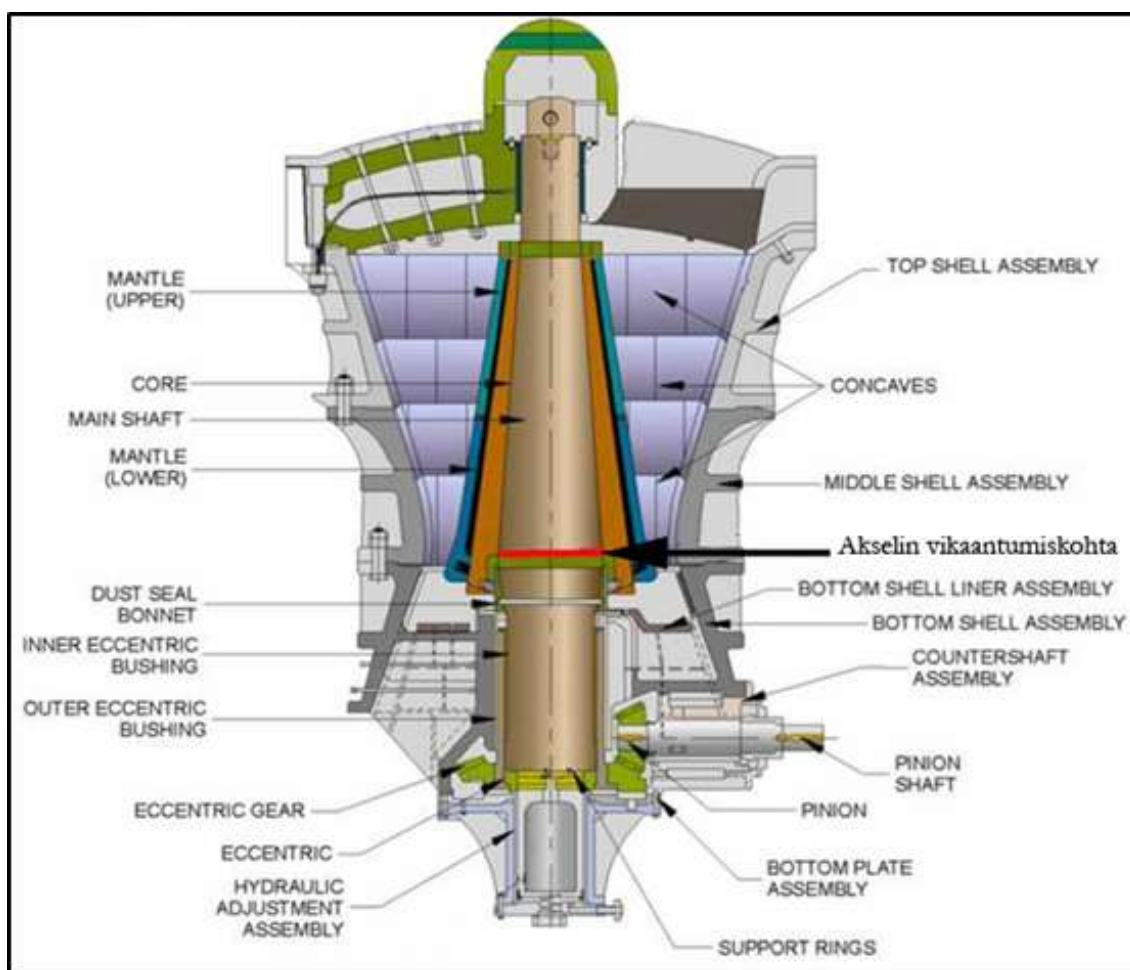
Tässä insinööriyössä mitattu karkeamurskaimen akseli oli vaurioitunut ajon aikana. Tarkkaa syytä akselin särkymiseen ei vielä tiedetä, mutta suuren metallikappaleen vaurioituminen voi johtua monista eri syistä. Akseliin kohdistuu ajon aikana suuria kuormitusvoimia, kuten staattista (akselin oma paino), vaihtelevaa ja iskumaista kuormitusta (prosessin aikainen kuormitus murskaimessa). [11, s. 41.]

Voimien ja momenttien lisäksi voi akseliin kohdistua ympäristön aiheuttamia rasituksia, esimerkiksi korkea pakkanen. Inhimillisiä syitä voivat olla käyttövirheet ja niistä seuranneet yli-kuormitustilanteet. Akselin materiaalitieto on luokiteltu salaiseksi, mutta metalliselle kappaleelle tyypillisiä vauriotyyppejä voivat olla väsymys- hauras- ja sitkeä murtuma, korroosiovauriot, virumismurtumat, kulumisvauriot ja mahdolliset valuvirheet. Kaivoksilla malmimurskeen mukana voi myös tulla vieraita esineitä, kuten kaivinkoneen kauhan kynsiä tai porakruunuja ja -kankia, jotka voivat aiheuttaa vahinkoa murskaimessa. [11, s. 41.]

### 3.2 Akselin kunnon mittaaminen

Akselin mittaukseen olisi hyvä käyttää ainetta rikkomattomia tarkastusmenetelmiä, joiden avulla voidaan tutkia akselissa mahdollisesti syntyneet epäjatkuvuuskohdat, esimerkiksi alka-

vat säröt. Näin säästettäisiin kustannuksia, kun akselia ei tarvitsisi vaihtaa turhan takia, jos se olisikin ehjä. Ideaalinen tilanne olisikin, että karkeamurskaimen akselia mitattaisiin tuotannon aikana ja näin voitaisiin seurata akselin kuntoa ja mahdollisten vikojen kehittymistä. Näin saataisiin ennakkoon tietoa akselin kunnosta mittaushetkellä ja voitaisiin minimoida mahdolliset vikaantumistilanteet tarkkailemalla akselin kuntoa säännöllisesti. Kuvassa 5 on esitetty karkeamurskaimen akselin tyypillisin vikaantumiskohta Talvivaarassa.



Kuva 5. Karkeamurskaimen akselin vikaantumiskohta. [6.]

Karkeamurskaamoon on suunniteltu kiinteää kunnonvalvontaa, jota on selvitetty Juha-Pekka Tolosen insinööritoimistossa. Siinä on selvitetty erilaisia kunnonvalvontajärjestelmiä ja mahdollisia mittauspisteitä. Suunnitelmissa ei kuitenkaan ole tarkoitus mitata aktiivisesti karkeamurskaimen akselin kuntoa, joten olisi tärkeä selvittää mahdollisuus myös akselin kunnon valvontaan. Määräaikaisella karkeamurskaimen akselin tarkastusmittauksella voidaan saada kiinni jo aikaisessa vaiheessa olevat viat. Akselin kunnon mittaaminen tulisi sisällyttää osaksi mitattavaa kunnossapitoa ja suorittaa aina kun se on mahdollista. [12.]

#### 4 AINETTA RIKKOMATTOMAT TARKASTUSMENETELMÄT

Tuotantoprosesseihin ja kaikenlaiseen tekemiseen liittyy olennaisesti aina silmämääräinen tarkastaminen, niin kauan kuin jotain on valmistettu. Suomessa silmämääräisiä tarkistuksia on tehty jo ennen toista maailmansotaa. Ensimmäiset viralliset tarkastajat ovat olleet Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen tarkastajia, joilla on ollut ammattitaito tarkastaa muilla tekniikoilla kuin silmämääräinen tarkastaminen. VTT:llä on ollut tärkeä rooli tarkastustoiminnan kehittämisessä ja tarkastajien kouluttamisessa. 50-luvulla VTT hankki tietoa ulkomailta, koulutti teollisuutta ja teki tarkastuksia ympäri Suomea. [13, s. 12–13.]

VTT:llä oli samoihin aikoihin hallussa ultraäänilaitte, joka kuljetettiin junan avulla. Erilaisten säiliöiden pohjia tutkittiin imulaatikoiden avulla, mutta tunkeumanestetarkastuksista ei ollut vielä tietoa. Tarkastamiset alkoivat tuotantolaitoksista, kun yritykset halusivat tarkastaa omaa tuotantoaan. VTT oli pitkään ainoa tarkastuspalvelujen tarjoaja ja kouluttaja, mutta sitten AEL alkoi järjestää koulutusta VTT:n asiantuntijoiden avulla. [13, s. 12–13.]

VTT alkoi pätevoidä tarkastajia tutkintojen avulla, jotka perustuivat asiantuntijoiden arvioihin ja käytännön seuraamiseen. Suomalaisten standardien laatiminen loppui 80-luvulla, kun alettiin laatia EN-standardeja. Samaan aikaan Suomessa kehitettiin Barkhausenin kohinaan perustuva tarkastusmenetelmä. [13, s. 12–13.]

90-luvun puolivälissä julkaistiin ensimmäiset EN-standardit ja samalla alettiin kouluttaa tarkastajia eri tarkastusmenetelmille. Tästä eteenpäin toiminta alkoi kansainvälistyä ja alan isoimmat palveluntuottajat olivat ulkomailla. Samalla siirryttiin EN-standardeista maailmanlaajuiseen ISO-standardiin. Näiden 60 vuoden aikana ainetta rikkomattomat tarkastusmenetelmät ovat vakiinnuttaneet asemansa erilaisten tuotteiden ja rakenteiden turvallisuuden varmistamiseen valmistuksen aikana ja sen jälkeen. [13, s. 12–13.]

Seuraavaksi on tutustuttu yleisimpiin ainetta rikkomattomiin tarkastusmenetelmiin. Menetelmissä on esitelty pääpiirteittäin tarkastusmenetelmän periaate ja mahdolliset käytännön sovelluskohteet.

#### 4.1 Visuaaliset tarkastusmenetelmät

Visuaalinen eli silmämääräinen tarkastusmenetelmä on yleisin ja käytetyin laitteiden tai prosessien tarkastamismenetelmistä. Silmämääräistä tarkastusta tulee käyttää aina muiden NDT-tarkastusten yhteydessä ja mahdollisesti ennen mittauksen aloittamista. Silmämääräisiä tarkastusmenetelmiä käytetään yleisesti valukappaleiden ja hitsausten pintapuoliseen tarkastamiseen. [14, s. 256.]

##### 4.1.1 Silmämääräinen

Silmämääräinen tarkastaminen on erittäin käyttökelpoinen menetelmä, jos siihen yhdistetään kokemusta ja uusia mittausmenetelmiä. Näin saavutetaan hyvä mittaustarkkuus ja luotettava tulos. Ihmissilmä pystyy havaitsemaan halkaisijaltaan noin 50  $\mu\text{m}$ , mutta pienempien kohteiden apuna tarvitaan jo muita tarkastusmenetelmiä, esimerkiksi magneettijauhe- ja tukkeumanestetarkastusmenetelmiä. Silmämääräisen tarkastuksen apuna käytetään yleensä suurenuslaseja ja erilaisia peililaitteita, mutta näiden käyttämiseen tarvitaan kokemusta. [14, s. 256.]

##### 4.1.2 Endoskopia

Endoskopiassa tutkitaan kotelaitteita ja putkia sisältäpäin endoskoopin avulla. Endoskooppi on tähystyslaite, jossa on optinen putki. Optisen putken avulla voidaan tähystää esimerkiksi putken sisään pienestä tähystysreiästä. Tarkasteltavaa kohdetta voidaan valaista optisen putken päässä olevalla valolla. Tähystyslaitteita on olemassa kahta erilaista versiota, boroskooppi ja fiberoskooppi. Laitteet ovat fyysisesti melkein samanlaisia, mutta boroskoopissa on jäykkä optinen putki, joka siirtää kuvan erilaisten linssisysteemien avulla nähtäväksi. Fiberoskoopissa on taas taipuisa optinen putki, joka siirtää kuvaa valokuituoptiikan avulla ja kuvapäättä voidaan käännellä tarpeen mukaan. Boroskooppi ja fiberoskooppi voivat molemmat olla pituudeltaan jopa kymmenenkin metriä. [14, s. 256.] [15, s. 447.]

Endoskopiassa on myös käytössä videoskooppi, joka on taipuisa endoskooppi. Siinä kuvaa kohteesta siirretään sähköisesti, mutta muuten laite on samanlainen kuin fiberoskooppi. Put-



kia on saatavilla myös hermeettisesti suljettuina, jolloin näitä voidaan upottaa erilaisiin nesteisiin. Tarpeen vaatiessa endoskoopilla voidaan valaista tarkastettava kohde. Endoskoopeissa on usein mitta-asteikko säröjen mittaamista varten. Endoskopiaa käytetään pääasiassa painestiodien, kattiloiden ja turbiinien tarkastamiseen. Edellä mainittuihin prosessilaitteisiin on porattu lisäreiät endoskopiaa varten. [14, s. 256.] [15, s. 447.]

#### 4.1.3 Stroboskopia

Stroboskopiassa tarkastettavaa kohdetta valaistaan vilkkuvalla valolla, jonka taajuus on sama kuin pyörivän tai värähtelevän tarkastettavan kohteen taajuus. Kun stroboskoopin valon välähdystaajuus on sama kuin tarkastettavan kohteen, niin näyttää siltä kuin kohde pysähtyisi tai liikkuisi hitaasti. Tämän avulla voidaan mitata pyörimisnopeuksia, tarkastaa kohteen mahdollisia murtumia tai säröjä, esimerkiksi telojen pintavaurioita tai siipipyörien siipiä. Käytettäessä stroboskooppia on syytä olla varovainen, koska laite antaa virheellisen kuvan pyörivästä kohteesta. [15, s. 448.]

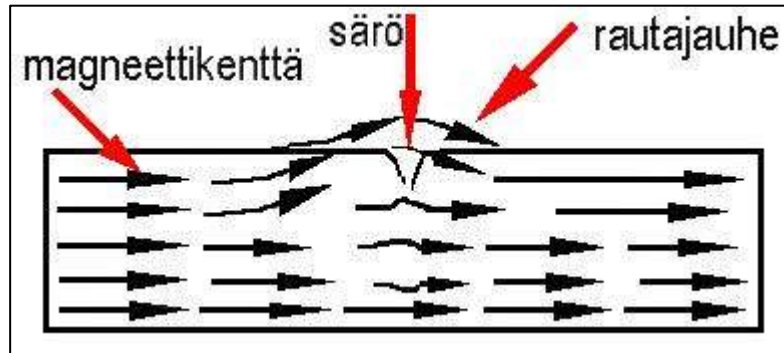
### 4.2 Pintatarkastusmenetelmät

Ainetta rikkomattomissa tarkastusmenetelmissä voidaan tutkia kappaleita myös erilaisilla pintamenetelmillä. Kun halutaan tutkia tarkemmin kappaletta, niin menetelmänä ovat erilaiset pintamenetelmät, joiden avulla voidaan tutkia esineen pinnalla esiintyviä säröjä, halkeamia, avoahuokosia ja imuonteloita. Ongelmana tässä menetelmässä on, että sillä voidaan tutkia vain kappaleen pintavikoja. Jos halutaan tarkastaa kappaleen sisäisiä epäjatkuvuuskohtia, niin tulee käyttää volymetrisiä tarkastusmenetelmiä yhdessä pintamenetelmien avulla.

#### 4.2.1 Magneettijauhetaarkastus

Magneettijauhetaarkastus perustuu siihen, että tarkastettavaan kappaleeseen aiheutetaan ensin voimakas magneettinen vuo, jonka avulla voidaan havaita epäjatkuvuuskohdat ferromagneettisissa aineissa. Tarkastettavan kappaleen tai esineen pintaan sivellään rautaoksidishiukkasia sisältävää nestettä, jolloin rautaoksidishiukkaset jäävät kappaleessa oleviin epäjatkuvuuskoh-

tiin. Näin kappaleen pinnassa tai pinnan läheisyydessä olevat epäjatkuvuuskohdat, esimerkiksi säröt, voidaan havaita silmämääräisesti tai jollakin laitteella. Vian paremman havaittavuuden edistämiseksi käytetään tarkastusnesteessä värillisiä hiukkasia. Kuvassa 6 on esitetty magneettijauhetautarkastuksen periaatekuva. [14, s. 257–259.] [15, s. 452.] [16, s. 6–16.]



Kuva 6. Magneettijauhemenetelmän periaate. [16, s. 6.]

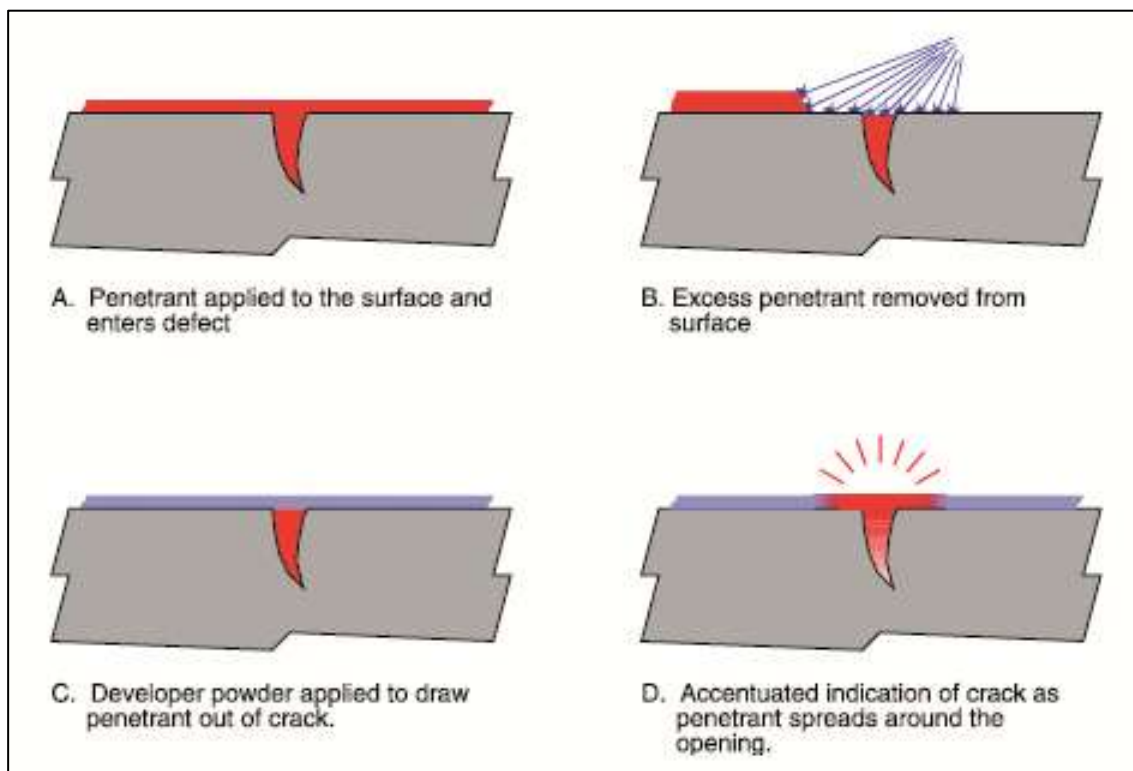
Magneettijauhemenetelmä sopii erittäin hyvin kapeiden vikojen löytämiseen ja tutkimiseen. Menetelmän avulla voidaan löytää pituudeltaan 1 mm:n ja leveydeltään 0,01 mm:n pintasäröjä. Magneettijauhemenetelmää käytetään pääasiassa hitsien ja valujen tarkastamiseen, mutta se soveltuu hyvin kaikkiin kapeiden epäjatkuvuuskohtien ja kriittisten kohteiden tutkimiseen. [14, s. 257–259.] [16, s. 6–16.]

#### 4.2.2 Tunkeumanestetarkastus

Tunkemanestemenetelmässä tarkastettavaan kohteeseen levitetään hyvin epäjatkuvuuskohtiin tunkeutuvaa joko värillistä tai fluoresoivaa nestettä. Kappaleen pinnasta pyyhitään ylimääräinen neste pois ja kuivataan. Tämän jälkeen tarkastettavan kappaleen pintaan levitetään kehitekerros. Kehitekerros imee epäjatkuvuuskohtaan jääneen nesteen ja näin tarkastettavasta kohteesta saadaan pintaan asti syntyneet viat esiin (kuva 7). Haittapuolena tässä menetelmässä on se, että sitä ei voida käyttää huokoisille materiaaleille. [14, s. 259–260.] [15, s. 452.]

Erilaiset tunkeumanesteet voidaan jakaa joko liuottimella poistettaviin, vedellä pestäviin tai jälkiemulgoitaviin nesteisiin. Ennen tarkastusta tulee selvittää, aiheuttavatko käytettävät kemikaalit mahdollisesti korroosiota tarkastettavassa kohteessa. Tunkeumanestetarkastus on herkkä ulkopuolisille vaikutteille, joten on aina ensin mietittävä mahdollista toista pintatarkastusmenetelmää, esimerkiksi magneettijauhemenetelmää. Tunkeumanestemenetelmällä on mahdollista havaita 1 mm:n pitkiä ja 0,1 µm:n levyisiä säröjä tarkastettavasta kappaleesta.

Tällöin lämpötilan tulisi olla noin 20 °C. Tunkeumanestemenetelmän avulla tutkitaan muun muassa akseleiden, puhaltimien ja turpiinien säröjä sekä lämpökäsittelyn aiheuttamia säröjä ja säiliöiden vuotoja. Kuvassa 7 on esitetty tunkeumanestetarkistuksen periaate. [14, s. 259–260.] [16, s. 16–27.]



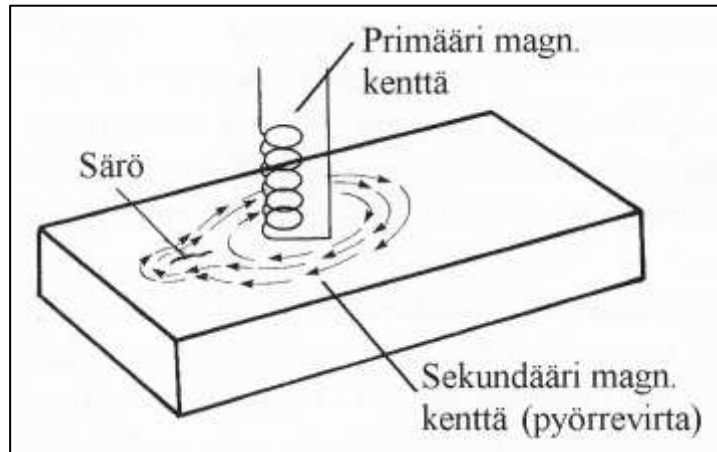
Kuva 7. Tunkeumanestetarkistuksen periaate. [17, s. 12.]

#### 4.2.3 Pyörrevirtatarkastus

Pyörrevirtamenetelmää käytetään sähköä johtavien aineiden ja kappaleiden pinnan ja pinnan läheisyydessä olevien säröjen ja vikojen etsimiseen. Menetelmää käytetään myös säröjen syvyyden ja kalvojen paksuuksien mittaamiseen. Pyörrevirtamenetelmän pääasialliset tarkastuskohteet ovat kuitenkin ei-ferromagneettisten ohuiden putkien tarkastaminen. [14, s. 266–267.] [15, s. 449–450.]

Pyörrevirtamenetelmässä tarkastettavaa kohdetta mitataan pyörrevirta-anturin avulla. Pyörrevirta-anturi sisältää pienen kelan, joka indusoi sähköä johtavaan rakenteeseen pyörrevirtoja vaihtovirtamagneettikentän avulla. Pyörrevirtojen avulla aineeseen muodostuu magneettikenttä. Pyörrevirta-anturin magneettikenttää kutsutaan primäärikentäksi ja tarkastettavaan kappaleeseen muodostunutta magneettikenttää sekundäärikentäksi. Kun näiden kahden

magneettikentän voimakkuuksia verrataan toisiinsa, voidaan havaita mahdolliset muutokset tarkastettavan kohteen magneettikentässä. Magneettikentän muutoksia voivat aiheuttavat muun muassa säröt ja sulkeutumat. Kuvassa 8 on esitetty pyörrevirtamenetelmän periaate. [14, s. 266–267.] [15, s. 449–450.]



Kuva 8. Pyörrevirtatarkastuksen periaate. [15, s. 449.]

Erilaisten materiaalien vaikutus tulee ottaa huomioon ennen mittauksen aloittamista. Käytännössä tämä tarkoittaa pyörrevirtamittalaitteen kalibroimista tarkastettavan materiaalin ominaisuuksien mukaan. Teollisuudessa pyörrevirtatarkastuksen tärkeimpiä kohteita ovat lämmönvaihtimien ja lauhduttimien sisäpuoliset tarkistukset. Lisäksi menetelmää käytetään säröjen, korroosion, metallin, ja korkean lämpötilan vaikutuksien havainnointiin erilaisissa materiaaleissa, myös materiaalin ja pinnoitteen paksuuden mittaamiseen ja sähkönjohtavuuden tarkastamiseen. [14, s. 266–267.] [15, s. 449–450.]

#### 4.2.4 Jäljennetarkastus

Kun halutaan tutustua kappaleen mikrorakenteeseen, niin useimmiten käytetään jäljennetarkastusmenetelmää. Yleensä tarkistettava kappale on sellainen, että siitä ei voida ottaa koepalaa laboraatiotutkimuksia varten. Tällöin tarkastettavasta kappaleesta otetaan jäljennös eli replika. Tarkastettava kappale puhdistetaan ensin mekaanisesti ja kiillotetaan elektrolyyttisesti. Tarkastettava kohta syövytetään, että saadaan näkyviin metallin mikrorakenne. Pintaan painetaan jäljennecalvo, joka voi olla esimerkiksi pehmennettyä muovia ja annetaan sen kovettua. Näin metallin mikrorakenteesta saadaan peilikuva, jota voidaan tutkia mikroskoopin avulla. [14, s. 271.] [15, s. 451–452.]

Mikroskoopin avulla saadaan jäljennös suurennettua jopa 500–1000-kertaiseksi. Jos halutaan vielä tarkempaa analyysiä tarkastettavasta kohteesta, niin on käytettävä elektronimikroskooppia. Tällöin jäljennecalvon pintaan täytyy muodostaa sähköä johtava pinta esimerkiksi kullasta. Jäljennetarkastusmenetelmän tarkastuksen aikainen lämpötila tulisi olla noin 5–40 °C. Jäljennetarkastusta käytetään kattiloiden, turbiinien ja höyryputkistojen eliniän määrittämiseen, tutkitaan pintojen kulumista esimerkiksi hammaspyöristä, virumisilmiöitä, säröytymistä ja pintaprofilin ja karheuden mittaamiseen. [14, s. 271.] [15, s. 451–452.]

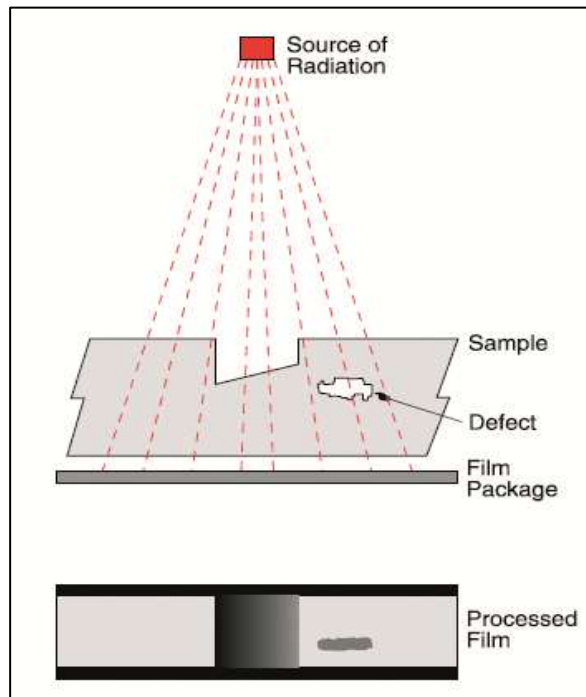
### 4.3 Volymetriset menetelmät

Kun halutaan tarkastaa materiaali tai kappale pintaa syvemältä eli tutkia sisäisiä epäjatkuvuuskohtia, käytetään tällöin volymetrisiä tarkastusmenetelmiä. Usein volymetrisiä menetelmiä käytetään yhdessä joko silmämääräisten tai pintatarkastusmenetelmien kanssa. Näin saadaan tarkempaa tietoa epäjatkuvuuskohdista, kun yhdistetään eri tarkastustapoja. Seuraavaksi on tarkasteltu muutamia pintaa syvemältä tarkistavia menetelmiä, jotka voidaan luokitella volymetrisiksi tarkastusmenetelmiksi.

#### 4.3.1 Radiografia

Radiografia-tarkastuksessa käytetään hyväksi röntgen- ja isotooppisäteilyä. Menetelmässä kohteen läpi lähetetään säteilyä, joka tallennetaan kohteen vastakkaisella puolella. Näin mahdollisia sisäisiä epäjatkuvuuskohtia voidaan tutkia tarkemmin. Menetelmän haittapuolena on mittauksen aikana syntyvä säteily, joka on ihmiselle vaarallista. Tällöin mittaustapahtuma täytyy järjestää ja ennakoida turvalliseksi. [16, s. 39–40.]

Radiografia-menetelmä on hyvä havaitsemaan kolmiulotteisia epäjatkuvuuskohtia, mutta erittäin heikko löytämään särötyyppisiä vikoja, esimerkiksi halkeamia. Pääasiassa radiografiaa käytetään teollisuuden hitsausten ja kattilaputkien ja seinämien valmistuksen ja korjauskuvaukseen. Kuvassa 9 on esitetty radiografia-mittauksen periaate. [14, s. 264–265.]



Kuva 9. Radiografia-menetelmän periaate. [17, s. 5.]

#### 4.3.2 Röntgenkuvaus

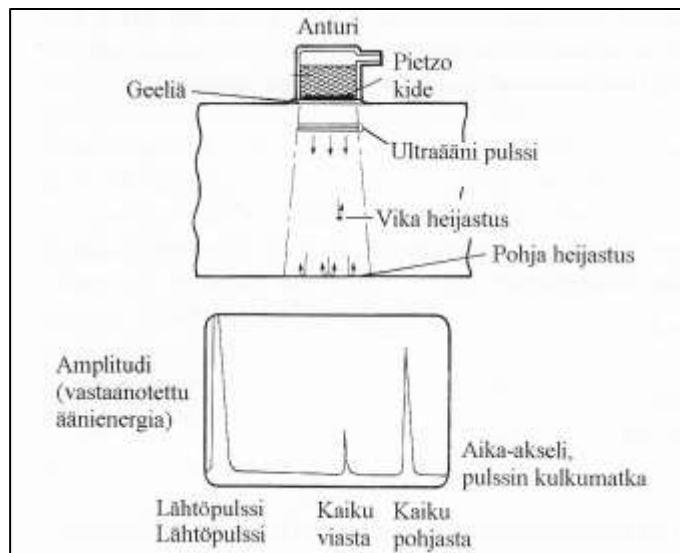
Röntgenkuvauksessa käytetään hyväksi säteiden heikentymistä tarkastettavassa kappaleessa olevissa epäjatkuvuuskohdissa. Röntgenkuvaus on menetelmänä pitkälti samanlainen kuin radiografia. Röntgen- ja gammasäteet läpäisevät hyvin kaikenlaiset materiaalit. Kappaleesta läpi menneet säteet kerätään talteen joko röntgensäteille herkälle filmille tai suoraan sähköisesti tietokoneelle. Kappaleessa olevat epäjatkuvuuskohdat näkyvät eri tummuuseroina kuin sellaiset kohdat, joissa ei ole tapahtunut säteen absorpoitumista. [15, s. 448.]

Röntgenkuvausta käytetään pääasiassa vaativien hitsaussaumojen tarkastamiseen, mutta sitä voidaan käyttää myös esimerkiksi paksuuksien mittauksiin terästeollisuudessa. Röntgenkuvauksen avulla saadaan hyvin näkyviin kolmiulotteisia epäjatkuvuuskohtia, esimerkiksi korroosion aiheuttamia kuoppia tai huokosia. Kuten radiologiassa, ei röntgentarkastuksellakaan saada näkyviin säröjä tai halkeamia, jos ne eivät ole säteilyn suuntaisia. [15, s. 448.]

### 4.3.3 Ultraääni

Ultraäänitarkistuksessa tarkastettavaan materiaaliin lähetetään ultraääntä, jonka takaisinheijastumisaikaa erilaisista epäjatkuvuuskohdista mitataan. Menetelmän avulla voidaan mitata ainepaksuuksia ja tarkastaa kappaleessa mahdollisesti olevia valmistus- tai materiaalivikoja. Ultraäänitulosten tarkastajan tai tulkitsijan ammattitaito on merkittävässä osassa, kun tulkitaan ultraäänen antamia tuloksia. Ultraäänitarkastuksen avulla voidaan mitata 0,01 mm:n tarkkuudella ainepaksuuksia, mutta yleensä mittausalue on noin 1–200 mm. [14, s. 261–263.] [15, s. 450–451.]

Ultraäänitarkistuksessa käytetään pääasiassa joko normaali- tai kulmaluotainta. Normaali-luotaimen etuna on se, että sen avulla voidaan löytää hyvin erilaisia kerrostumia, kun taas kulmaluotaimen avulla löydetään erilaisia halkeamia ja tutkitaan hitsaussaumojä. Peruseriaa-te ultraäänimittauksessa on yksinkertainen. Ultraäänianturista lähetetään ultraäänitaajuinen pulssi tutkittavaan materiaaliin tai esineeseen. Ääni etenee materiaalissa mekaanisena värähtely-nä ja heijastuu takaisin ultraäänianturiin mahdollisesta epäjatkuvuuskohdasta. Samassa an-turissa on sekä lähetin että vastaanotin ultraäänelle. Anturin ja tutkittavan materiaalin välissä käytetään esimerkiksi geeliä, että värähtelypulssi pääsee materiaaliin. Kuvassa 10 on esitetty ultraäänitarkastuksen periaate. [15, s. 450–451.]



Kuva 10. Ultraäänimittauksen periaate. [15, s. 450.]

Ultraäänen käyttökohteita ovat hitsaussaumojen ja materiaalin tarkistaminen, mahdollisten epäjatkuvuuskohtien, esimerkiksi säröjen etsiminen, valuvirheiden havaitseminen, paksuuden ja pinnoitteiden mittaaminen, siipipyörien tarkistamiseen ja mahdollisten epäpuhtauksien etsimi-

nen. Ultraäänitarkastaminen ja laitteiden käyttö vaatii ammattitaitoa luotettavan tuloksen saamiseksi. Ultraäänitarkastamisesta tarkemmin luvussa 5. [15, s. 450–451.]

#### 4.4 Akustinen emissio

Akustinen emissio on tekniikka, jossa käytetään hyväksi korkeita taajuuksia aistivaa pietsokidettä. Pietsokide muuttaa korkeataajuisen värähtelyn sähköiseksi signaaliksi, ja tätä signaalia tarkastellaan ja analysoidaan tarvittavilla laitteilla. [13, s. 30–33.]

Menetelmää käytetään kokonaisten komponenttien tai kappaleiden eheystarkasteluun. Akustisessa emissiossa käytetään hyväksi kappaleessa olevien vikojen ultraäänitaajuuksilla lähettämää signaalia. Tällainen tilanne saadaan aikaan esimerkiksi koeponnistamalla tarkastettava kappale. Näin kappaleessa olevissa epäjatkuvuuskohdissa tapahtuu muutoksia ja muutoksista aiheutuva ääni otetaan talteen kappaleen pinnalla olevilla pietsosähköisillä antureilla. Antureiden avulla viasta tuleva ultraääni muutetaan sähköisiksi pulsseiksi ja käsitellään tarvittavilla menetelmillä ymmärrettävään muotoon. Tämän avulla voidaan seurata mahdollisesti alkavia ainevikoja esimerkiksi online-mittauksen avulla. Akustista emissiota käytetään pääasiassa säiliöiden vikojen hakuun, ydinvoimaloissa ei-toivottujen esineiden havaitsemiseen prosessissa ja soodakattiloissa tapahtuvien muutosten havaitsemiseen. [14, s. 270–271.] [18, s. 8.]

#### 4.5 Barkhausen kohinamittaus

Barkhausenin kohinamittauksessa tarkastettavaan kappaleeseen kohdistetaan vaihtuva magneettikenttä. Magneettikenttä aiheuttaa kappaleeseen ns. Barkhausenin kohinan. Barkhausen Noise Analysis (BNA) on menetelmä, jota kutsutaan myös magnetoelastiseksi tai mikromagneettiseksi menetelmäksi, ja se perustuu äänen kaltaisen signaalin havainnointiin materiaalis-  
sa. Tämä syntyy, kun magneettikenttä suunnataan ferromagneettiseen kappaleeseen. Kyseisen ilmiön on löytänyt vuonna 1919 saksalainen tiedemies professori Heinrich Barkhausen. [15, s. 453–455.]

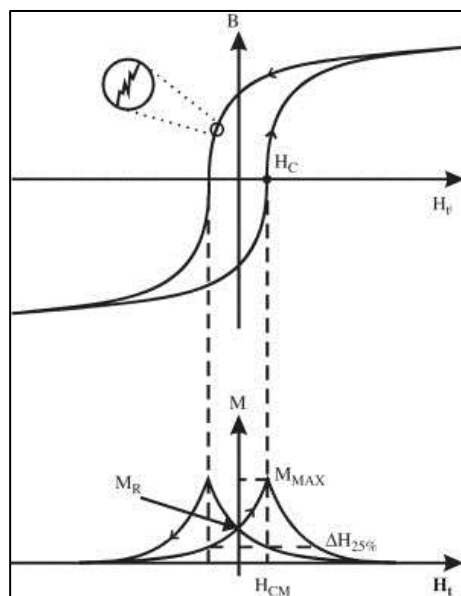
Kun tarkastettava materiaali on ferromagneettista, niin se sisältää pieniä magneettisia alueita. Nämä muodostavat materiaaliin yksittäisiä, rajattuja magnetoituvia alueita. Mittausmenetelmässä kyseisiä alueita magnetoidaan kyllästymispisteeseen asti mikrorakenteen helpottamaan



suuntaan. Magnetoituneita alueita erottavat toisistaan aluerajat. Kun tarkastettavaan materiaaliin johdetaan jaksoittaisesti vaihtuva magnetointikenttä, alkavat aluerajat siirtyä edestakaisin helpoiten magnetoituvaan suuntaan. Jotta näin voisi tapahtua, on toisen puolen alueen pienennettävä ja toisen kasvettava. Lopputulos on materiaalin magnetoitumisen kokonaistason muutos. [15, s. 453–455.]

Kokonaistason muutokset havaitaan tarkastettavan kappaleen pinnalta kela-anturilla. Magnetoitumisprosessiin vaikuttaa olennaisesti kappaleen materiaalin magnetoitumisen hystereesikäyttäytyminen. Hystereesikäyttäytyminen ei ole jatkuvaa, vaan se muodostuu pienistä askeleista. Askeleita alkaa muodostua, kun magnetoituneet alueet liikkuvat syötetyssä magneettikentässä. Kun materiaalissa useat alueita liikuttavat pulssit summautuvat yhteen, muodostuu tästä Barkhausenin kohina. [15, s. 453–455.]

Barkhausenin kohinan taajuusalue alkaa mittavasta magnetointitaajuudesta ja ulottuu jopa 2 MHz taajuuteen. Mitä syvemmälle signaali tarkastettavassa materiaaliin etenee, vaimenee signaali eksponentiaalisesti. Vaimenemiseen vaikuttavat Barkhausenin kohinan taajuus, materiaalin sähkönjohtokyky ja permeabiliteetti. Käytännössä Barkhausenin kohinamittauksen syvyys on luokkaa 0,01–1,5 mm. [15, s. 453–455.]



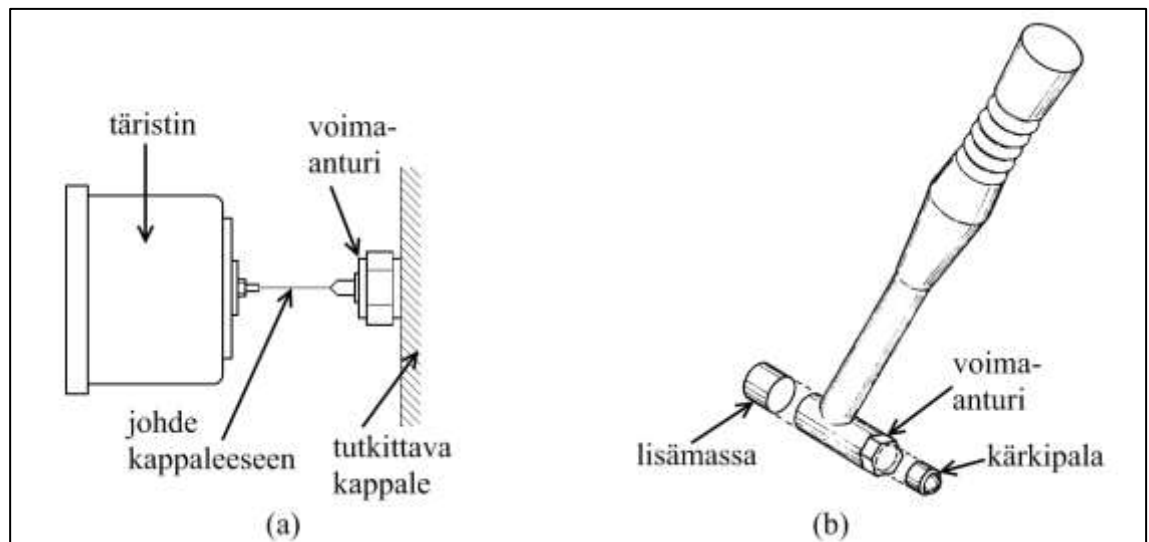
Kuva 11. Barkhausenin kohinan periaate. [19.]

Barkhausenin kohinamittausta käytetään ferromagneettisten aineiden tarkistamiseen, jäännös- ja hitsausjännitysten mittaamiseen, lämpökäsittelyvirheiden ja kovuuden muutosten havainnointiin. Kuvassa 11 on esitetty Barkhausenin kohinan toimintaperiaate. [15, s. 453–455.]

#### 4.6 Moodianalyysi

Moodianalyysi on kokeellinen menetelmä, jolla määritetään ja tutkitaan rakenteen ominaisuuksia, ominaismuotoja ja vaimennusta. Menetelmässä rakenteeseen johdetaan heräte ja tutkitaan miten rakenne käyttäytyy ja mitataan siitä saatu vaste. Moodianalyysistä saatavien mittaustulosten perusteella voidaan luoda uusia tai tarkentaa jo rakenteesta luotuja matemaattisia malleja. Moodianalyysi vaatii oman laitteiston, jota käytetään vain moodianalyysiä varten. [20, s. 11–15.]

Moodianalyysilaitteisto koostuu analysaattorista, A/D-muuntimesta ja signaalin vahvistimesta, värinäherätteen aiheuttajista ja antureista. Rakenteen herätteenä käytetään joko tärhistintä (kuva 12) tai impulssivasaraa (kuva 12), jotka aiheuttavat rakenteeseen määrätynlaisen herätteen. [20, s. 11–15.]



Kuva 12. Moodianalyysissä tarvittavat herätteen antajat. [20, s. 13.]

Moodianalyysiä käytetään pääasiassa koneiden ja rakenteiden suunnittelussa ja tutkimisessa. Suunnitelluista koneista rakennetaan prototyyppkejä, joiden eri ominaisuuksia voidaan tutkia ja kehittää moodianalyysin avulla. Moodianalyysillä voidaan selvittää koneiden käytön aikaisia ongelmia, joita on ilmennyt huonon suunnittelun vuoksi. [20, s. 22–25.]



## 5 MITTAUSMENETELMÄN VALINTA

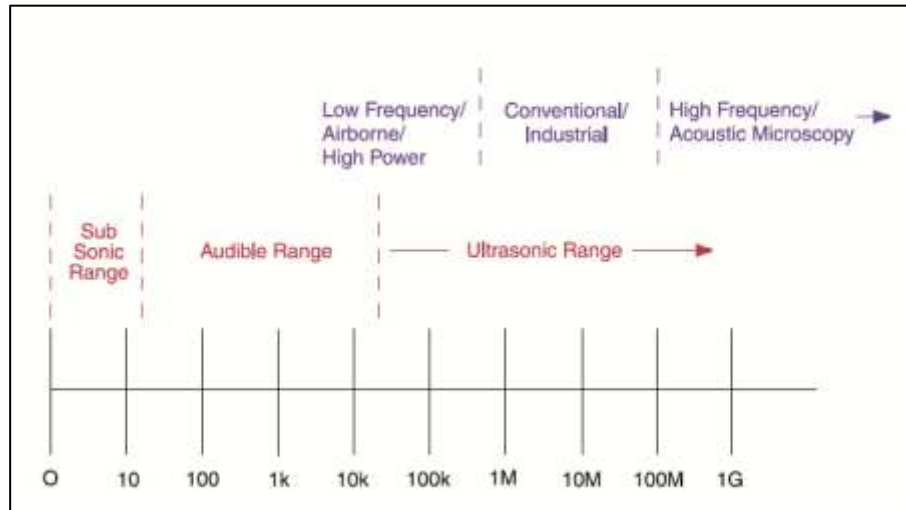
Karkeamurskaimen akselin mittausmenetelmäksi valikoitui ultraäänimenetelmä, koska sen avulla voidaan tutkia akselin sisällä mahdollisesti alkavia epäjatkuvuuskohtia, esimerkiksi säröjä. Ultraäänimittaus on vaaraton ja helppo verrattuna esimerkiksi röntgenmittaukseen. Röntgenmittauksessa tulisi järjestää mittaustila, joka olisi turvallinen ympäristölle ja mittaajalle, toisin kuin ultraäänimenetelmässä, joka on vaaraton ihmiselle ja ympäristölle. Röntgenlaitteisto on suuri ja vaikeasti siirrettävä, kun taas ultraäänilaitteet ovat helposti siirreltäviä, koska ne ovat pääasiassa kannettavia laitteita.

Ultraäänen avulla päästään tarkastelemaan suuren metallikappaleen sisäistä rakennetta toisin kuin muilla NDT-menetelmillä, koska niiden avulla tutkitaan pääasiassa materiaalien pintoja ja pinnan läheisyydessä olevia epäjatkuvuuskohtia. Toiset NDT-menetelmät eivät olisi sovelletuneet akselin mittaukseen, koska haluttiin tutkia ja tarkastella akselin sisäistä rakennetta. Esimerkiksi endoskopiassa olisi pitänyt tehdä akseliin reikä tähytämistä varten ja tämä ei ole mahdollista.

Ultraäänen valintaa mittausmenetelmäksi tukevat taulukossa 1 olevat soveltuvuudet esimerkiksi säröjen ja murtumien havaitsemisesta. Ultraäänen avulla voidaan myös mitata vaikean muotoisia kappaleita. Tämä vaatii kuitenkin tarkat esitiedot rakenteesta, materiaalista ja oikeanlaiset ultraäänilaitteet ja luotaimet. Ultraäänilaitteet ovat kannettavia, ja näin niiden avulla päästään tarkastettavan kohteen luokse ja voidaan suorittaa tarkastusmittaus myös vaativissa olosuhteissa.

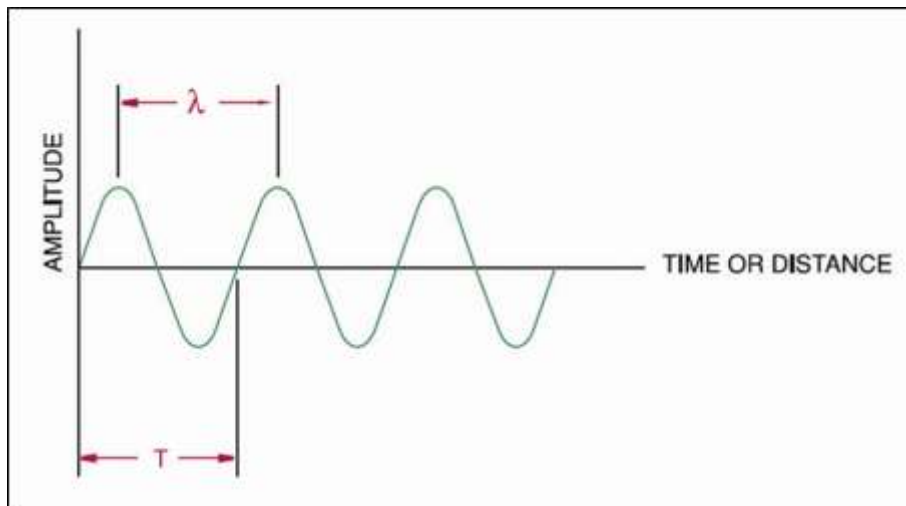
Ultraäänen avulla voidaan tarkastaa monenlaisia erilaisia kohteita, ja se on monipuolinen tarkastusmenetelmä. Ultraäänen avulla voidaan havaita mitattavasta kohteesta alkavat säröt ja niiden suunta ja suuruus. Tiedon avulla voidaan tehdä päätökset tarvittavista jatkotoimenpiteistä. Seuraavaksi tarkastellaan ultraääniperiaatetta ja -tarkastusta lähemmin ja tutustutaan eri laitteisiin, joiden avulla ultraäänitarkastuksia suoritetaan.

Kun ääniaallot ovat yläpuolella ihmisen kuulokyvyn ( $<20$  kHz), sitä kutsutaan tällöin ultraääneksi (kuva 12). Kuitenkin ultrataajuuksista käytetään ultraäänitarkastuksessa vain aluetta 20 kHz – 50 MHz.



Kuva 12. Äänitaajuuudet. [21.]

Koska ultraäänien taajuus on normaaliääneen verrattuna todella tiheää, niin tällöin se heijastuu todella pienistä pinnoista, esimerkiksi säröistä. Tämän takia ultraääni on monipuolinen tarkastusmenetelmä erilaisten lähellä pintaa ja tarkastettavan kappaleen sisällä olevien epäjatkuvuuskohtien etsimiseen ja löytämiseen. [21.]



Kuva 13. Ultraäänitaajuuden periaate. [18.]

Ultraääni etenee aaltolina samalla lailla kuin esimerkiksi valo, mutta ultraääni tarvitsee kulkeutumiseen joustavan väliaineen, joko vettä tai kiinteän materiaalin. Ultraäänitarkastus perustuu-

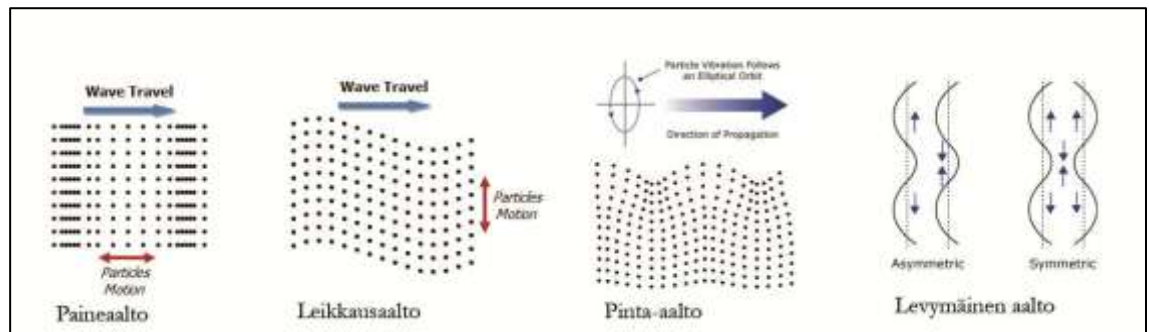
kin hyvään kappaleen tai materiaalin äänenjohtamiskykyyn. Kuvassa 13 on esitetty ultraääni-taajuuden periaate, jossa on aallonpituus  $\lambda$  ja aika  $T$ . [21.]

Ultraäänimittaus perustuu fysiikan kaavaan, jossa  $c$  = äänennopeus (m/s),  $f$  = taajuus (Hz) ja  $\lambda$  = aallonpituus (m). [16, s. 27.] [21.] [22, s. 4.]

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Ultraäänen yhteydessä on termi Hz (hertsi) olennainen käsite. Se on taajuuden yksikkö, jossa värähtelyjaksot toistuvat sekunnin välein, esimerkiksi 1000/sekunti on tällöin 1 kHz. Hertsi tulee kin kaavasta, jossa  $s$  on yhteen värähdykseen kulunut aika sekunteina. Esimerkiksi teräkseen pitkittäissuuntainen aallon nopeus on 5850 m/s, niin silloin ultraäänen aallonpituus on 5.85 mm 1 MHz taajuudella. [23, s. 6.]

Kiinteissä aineissa ääniaallot etenevät neljällä pääasiallisella tavalla, jotka perustuvat siihen, miten hiukkaset värähtelevät kappaleessa. Ääni voi edetä pitkittäis-, leikkaus-, pinta- ja levy-aaltoina. Pitkittäis- ja leikkausaallot ovat kaksi eniten käytettyä tapaa ultraäänimittauksessa. Kaikkien ääniaaltojen peruseriaatteet on esitetty kuvassa 14. [23, s. 3.]



Kuva 14. Eri ultraääniaaltojen periaatteet. [23.]

Pitkittäisaalto (paineaalto) on aalto, jossa kappaleen hiukkasten liike on samaan suuntaan kuin ultraäänen etenemisen aalto. Ne etenevät kaikissa materiaaleissa tihentymien ja harven-tumien välityksellä. [22, s. 14.]

Leikkausaalto on aaltoliike, jossa hiukkasten liike on kohtisuorassa etenemissuuntaan näh-den. Poikittaisaalloilla värähtelevät atomit poikittain aallon etenemissuuntaan nähden. Äänen värähtely tapahtuu leikkausvoimien vaikutuksesta. Poikittaisaallot etenevät vain kiinteissä aineissa, eli ei koskaan nesteissä tai kaasuissa. Tämän lisäksi poikittaisaallot etenevät huomattavat hitaammin kuin pitkittäisaallot samassa materiaalissa. [23, s. 4.]

Pinta-aallot ovat yhdistelmä pitkittäis- ja leikkausaaltoja. Ne kulkevat kappaleen pinnan myötäisesti yhden aallonpituuden syvyydessä. Pinta-aallot syntyvät, kun pituussuuntainen aalto kohtaa poikkisuuntaisen aallon pinnan läheisyydessä. Pinta-aallot ovat erittäin hyödyllisiä, koska niiden avulla voidaan havaita pinnan lähellä olevia pieniä epäjatkuvuuskohtia ja ne seuraavat hyvin pinnan muotoja. Tämän vuoksi pinta-aalloilla voidaan tutkia sellaisia alueita, joihin muilla aalloilla ei päästäisi. [23, s. 5.]

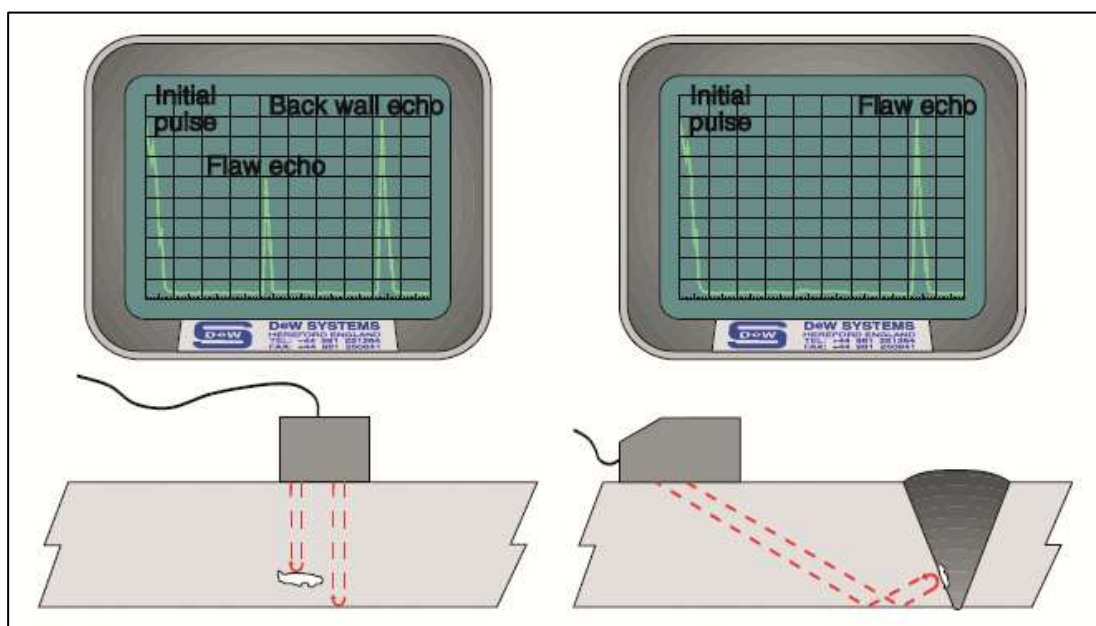
Levymäisiä aaltoja käytetään materiaaleille, joiden paksuus on pienempi kuin ultraäänien aallonpituus. Näiden avulla tutkitaan isoja, laajoja pintoja ja niiden paksuuksia. [23, s. 5.]

### 5.1 Ultraäänitarkastus

Ultraäänimittauksessa kappaleeseen lähetetään ultraääntä luotaimen avulla. Luotaimessa oleva pietsokide värähtelee vaihtovirran avulla tietyllä taajuudella lähettäen ne kappaleeseen. Pietsokiteenä käytetään yleensä kvartsia. Takaisin kappaleesta palaavat ultraäänit ovat tulleet takaisin joko kappaleen takaseinästä tai mahdollisesti kappaleessa olevasta epäjatkuvuuskohdasta. Sama luotain ottaa myös vastaan lähettämänsä ultraäänit. Kun tiedetään äänen kulkusuunta, äänennopeus ja kulkuaika materiaalissa, voidaan näiden tietojen perusteella päätellä vian mahdollinen paikka ja suuruus. Luotaimen ja tarkastettavan kappaleen väliin laitetaan nestettä tai kytkentäainetta, jotta ultraääni kulkisi luotaimen ja kappaleen välillä. [16, s. 28.]

Ultraäänimittauksessa käytetään joko normaali- tai kulmaluotaimia. Normaaliluotaimen avulla mitataan pääasiassa kerrostumia ja pinnan paksuudenmittauksia. Kulmaluotaimen avulla löydetään erilaiset halkeamat ja säröt. Usein on myös käytössä ultraäänimittalaitteita, jossa on molemmat luotaimet samassa laitteessa.

Haittapuolena ultraäänimittauksessa on austeniittinen teräs, joka vaimentaa tehokkaasti ultraääntä. Tästä huolimatta ultraäänimittaus sopii erittäin hyvin useille teollisuuden aloille erilaisiin tarkastuksiin ja laadunvalvontaan. Kuvassa 15 on esitetty normaali- ja kulmaluotaimen periaate. [15, s. 450.]



Kuva 15. Normaali- ja kulmaluotaimen periaate. [17, s. 15.]

Normaaliluotaimen (kuva 16) avulla löydetään parhaiten kappaleen pinnan suuntaisia vikoja. Luotaimessa on yksi pietsokide ja käytetään pitkittäisaaltoja esimerkiksi teräkselle 5900 m/s. Luotaimen tarkastuskulma on samansuuntainen kuin kappaleen pinta eli 0 astetta, ja taajuusalueena käytetään normaalisti 1–5 MHz. [14, s. 28–29.]

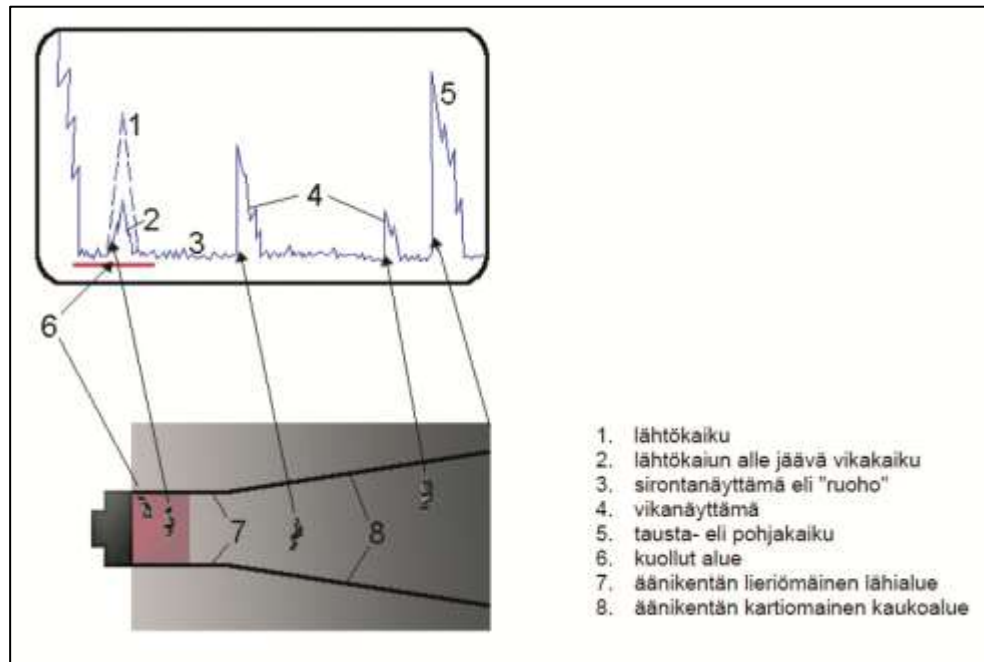


Kuva 16. Normaaliluotaimia. [24.]

Kulmaluotaimen tarkastuskulma on 30–70 astetta ja taajuus on sama kuin normaaliluotaimella. Kulmaluotaimessa käytetään poikittisaaltoja. Kulmaluotaimen avulla löydetään paremmin epäjatkuvuuskohtia, jotka ovat kohtisuorassa kappaleen pintaan nähden. Usein voidaan käyttää myös normaali- ja kulmaluotaimen yhdistelmää. [16, s. 28–29.]

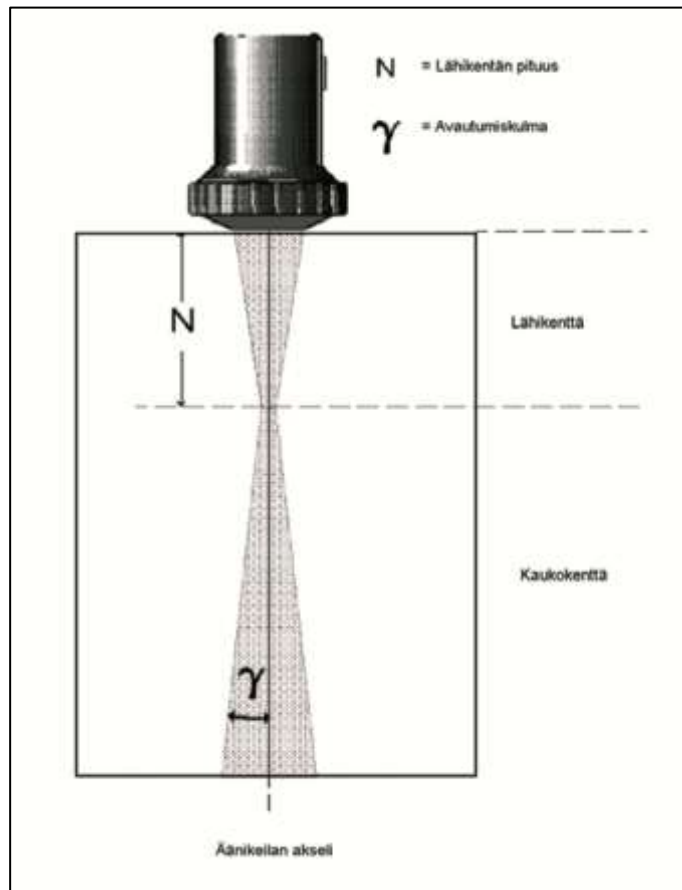


Jos ultraäänitarkastuksessa keskitytään vain epäjatkuvuuskohtien löytämiseen, ultraäänitarkastuksen pääkohdat jaetaan seuraavasti: epäjatkuvuuskohdan havaitseminen, paikantaminen, arvioiminen ja arvostelu. Nämä käydään läpi, jonka jälkeen voidaan sanoa, onko epäjatkuvuuskohta millainen vika, esimerkiksi särö. Kuvassa 17 on esitetty ultraäänitarkastuksen periaate. [22, s. 5.]



Kuva 17. Ultraäänitarkastuksen periaate. [16, s. 30.]

Luotaimella on oma vaikutusalue, jonka ultraääni peittää tarkastuskohteesta. Tarkastuskohteen peittävää aluetta kutsutaan äänikeilaksi, ja sen koko ja muoto ovat riippuvaisia luotaimen ja tarkastettavan materiaalin ominaisuuksista. Alueet voivat olla joko fokusoiva (lähi-kenttä) tai laajeneva alue (kaukokenttä) (kuva 18). Äänikeilan keskilinjaa kutsutaan äänikeilan akseliksi, ja sen muoto onkin tärkeä tarkastukseen sopivan luotaimen valinnassa. [22, s. 5–6.]



Kuva 18. Äänikeila. [22, s. 6.]

## 5.2 Ultraäänilaitteita UT-mittaukseen

Ultraäänilaitteilla voidaan mitata useita erilaisia kohteita, ja niille on kehitetty omat ultraäänilaitteensa. Tässä luvussa keskitytään muutamiin markkinoilla oleviin ultraäänilaitteisiin, joiden avulla voidaan havaita tarkastettavasta kappaleesta tai materiaalista epäjatkuvuuskohtia. Samalla on tarkasteltu muutamia ultraääniluotaimia ja kalibrointikappaleita.

### 5.2.1 DryScan 410D

DryScan 410D (kuva 19) on TeknoNDT Oy:n edustama ultraäänilaitte. Laite on monipuolinen ja soveltuu hyvin erilaisiin ultraäänimittauksiin. Etuna muihin laitteisiin nähden tässä laitteessa ei tarvita kontaktinestettä luotaimen ja tarkastettavan kappaleen välillä. Useat geometriset seikat, jotka yleensä vaikuttavat perinteiseen ultraäänimittaukseen, eivät vaikuta tämän ultraäänilaitteen mittaustuloksiin. Ultraäänilaitte on erittäin herkkä huomaamaan tarkastetta-

vassa kappaleessa olevat epäjatkuvuuskohdat ja laite vaatii vain alimman tason koulutuksen laitteen käyttämiseen. [24.]



Kuva 19. DryScan 410D. [24.]

#### 5.2.2 EPOCH 1000

EPOCH 1000 (kuva 20) on Olympus NDT Oy:n valmistama ultraäänilaite. Laite soveltuu hyvin kaikenlaiseen materiaalien tarkastamiseen ja laadunvalvontaan. Laite on kannettava, ja ison näytön ansiosta on tarkastuksen mittaustuloksia helppo tulkita. [25.]



Kuva 20. EPOCH 1000. [25.]

### 5.2.3 Kalibrointikappale ja luotain

Yleensä ultraäänilaitte kalibroidaan, ja siihen käytetään kalibrointikappaleita. Näiden kappaleiden avulla kalibroidaan ultraäänilaitteen poikittaissaallon emissiopistettä ja anturikulmaa. Samalla tutkitaan laitteen herkkyyttä ja resoluutiota. Kuvassa 21 on esitetty eräs ultraäänilaitteen kalibrointiin tarkoitettu kalibrointikappale. [24.]



Kuva 21. Ultraäänilaitteen kalibrointikappale. [24.]

Markkinoilla on myös ultraääniluotaimia, joita voi erikseen ostaa ultraäänilaitteeseen tai johonkin muuhun tarkoitukseen. Ultraääniluotaimia on useita erilaisia moneen eri tarkoitukseen. On olemassa kulma-, toft-, uppoallas-, yksi- ja kaksoiskide-, pyöröanturi- ja vaiheistusluotaimia. Kuvassa 22 on yksikiteisiä kulmaluotaimia. [24.]



Kuva 22. Yksikide-kulmaluotaimia. [24.]

Ultraäänilaitteille on myös saatavilla omia datanhallintaohjelmia, joiden avulla voidaan hallita saatuja mittaustuloksia. Ohjelman avulla voidaan myös kalibroida ultraäänilaite kalibrointikappaleen avulla, ja näin saadaan niistä testitulokset ja -tiedot jokaiselle luotaimelle. [24.]

### 5.3 NDT-tarkastajat

Ainetta rikkomattomien menetelmien mittausten suorittajat ja tarkastajat ovat sertifioituja henkilöitä. Mittauksen suorittajan tulee olla NDT-mittauksia suorittavan yrityksen palveluksessa. Suomessa NDT-testaajia kouluttavat pääasiassa AEL ja Inspecta Sertifiointi Oy. Kouluttavat ja myöntävät SFS-EN ISO 9712-standardin mukaisia koulutuksia ja tutkintoja. Yleensä tarkastajilla on tekninen koulutus pohja, mutta alan yritykset kouluttavat tarkastajat tarpeidensa mukaisesti. [26.]

## 6 KARKEAMURSKAIMEN AKSELIN MITTAAMINEN

Talvivaara Oy:n karkeamurskaimen akselin kunnon mittaaminen tapahtuu ultraäänimenetelmän sekä magneettijauhetarkastuksen avulla. Ensin akselille tehdään silmämääräinen tarkastelu. Tämän jälkeen suoritetaan magneettijauhetarkastus mahdollisten vauriokohtien paikantamiseksi ja ultraäänen avulla tutkitaan epäjatkuvuuskohtien syvyys ja laajuus. Tarkastuksen suorittajaksi valittiin DEKRA Industrial Oy, joka tekee yhteistyötä Talvivaaran kanssa.

### 6.1 Yrityksen esittely

DEKRA-konserni on yksi suurimmista mittaus- ja eri alojen asiantuntijayrityksistä maailmassa. Yrityksellä on tällä hetkellä toimintaa lähes 50 eri maassa, muun muassa Yhdysvalloissa, Japanissa ja Kiinassa. Työntekijöitä DEKRA:lla on maailman laajuisesti noin 27 000. DEKRA:lla on kolme pääasiallista liiketoimintayksikköä: Automotive, Industrial ja Personnel. Suomessa on DEKRA Industrial Oy, ja heidän palveluksessaan noin 200 asiantuntijaa 18 eri paikkakunnalla. Vuonna 2011 DEKRA-konsernin liikevaihto oli yli 2 000 miljoonaa. [27.]

DEKRA Industrial Oy:n palveluja Suomessa ovat painelaitteiden määräaikaistarkastukset, vaatimustenmukaisuuden arvioinnit, sähkölaitteiden ja palonilmaisulaitteistojen tarkastukset sekä NDT- ja DT-testaukset. DEKRA Industrial Oy toimii Suomessa muun muassa Olkiluoto 3-projektin mekaanisten asennusten NDT-tarkastajana. [27.]

### 6.2 Mittauksiin käytetyt laitteet

Karkeamurskaimen akseli päätettiin mitata ultraäänen lisäksi myös aluksi toisella NDT-menetelmällä, joksi valittiin magneettijauhetarkastus. Magneettijauhetarkastukseen käytettiin valkoista kontrastimaalia tuotemerkiltään Bycotest 104 ja mustaa metallihiukkasia sisältävää Bycotest 103 -maalia. Magneetikentän aikaansaamiseksi otettiin verkkovirtaa Talvivaaran kaivosvarikon kentän sähköpisteestä.

Magneettijauhemittauksen magneetikentän luomiseen käytettiin vaihtovirtaa, koska sen avulla saadaan aikaan parempi magneetikenttä kuin tasavirtaisella virtalähteellä. Magneetti-

kentän luomiseksi käytettiin vaihtovirtaan perustuvaa magnetointilaitetta, joka on esitetty kuvassa 23.



Kuva 23. Magneettitarkastuksen magnetointilaite.

Ultraäänimittaukseen käytettiin Krautkramer USM 25 -laitetta (kuva 24), joka soveltuu hyvin erilaisten kohteiden ultraäänitarkastukseen.



Kuva 24. Ultraäänimittauslaite Krautkramer USM 25.



Lisäksi käytettiin muutamia erilaisia normaali- ja kulmaluotaimia (kuva 25). Luotaimen ja akselin välisenä kontaktiaineena käytettiin kaivosvarikolta saatua öljyä.



Kuva 25. Erilaisia normaali- ja kulmaluotaimia.

### 6.3 Mittauksen kulku

Mittauspäiväksi ja -paikaksi sovittiin DEKRA Oy:n kanssa 1.3.2013 Talvivaaran kaivosvarikon kenttä. Mittauksia tuli suorittamaan DEKRA Oy:ltä Petteri Aspegren, joka on koulutukseltaan ja ammatiltaan 2-tason NDT-tarkastaja. Sää oli kyseisenä päivänä erittäin kylmä, koska pakkasta oli  $-11,5^{\circ}$  ja tuulta 10 m/s. Muuten keli oli hyvin aurinkoinen ja ei satanut lunta, joka olisi mahdollisesti vaikuttanut mittauksiin. Näin kuitenkin saatiin tasaiset mittausolosuhteet, eikä akselin pinta ollut märkä esimerkiksi vesisateen johdosta.

Karkeamurskaimen akseli on varastoituna kaivosvarikon kentälle suojaressun alle. Suojaressun päällä ollut lumi ja suojaressu poistettiin niin, että päästiin tutustumaan ja tarkastelemaan lähemmin akselin pintaa. Akselin pääasiallinen vikaantumiskohta (kuva 5) otettiin esille ja akselia tutkittiin silmämääräisesti. Tarkastaja ei havainnut akselissa silmämääräisesti



mitään normaalia poikkeavaa. Kuvassa 26 on karkeamurskaimen akselin varastointipaikka kaivosvarikolla.



Kuva 26. Karkeamurskaimen akselin säilytyspaikka kaivosvarikolla.

Seuraavaksi akselin pintaa sulateltiin käsikäyttöisellä nestekaasulämmittimellä. Tämä tehtiin sen vuoksi, että magneettitarkastuksessa käytetty kontrastimaali saataisiin tarttumaan paremmin akselin pintaan. Tämän jälkeen akselin pintaan levitettiin valkoista maalia (kuva 27), jonka avulla saatiin akseliin aikaiseksi valkoinen kontrastipinta. Näin mahdolliset epäjatkuvuuskohdat näkyvät paremmin akselin pinnasta, koska metallihiukkaset ovat mustia.



Kuva 27. Magneettitarkastuksen valkoinen kontrastimaali levitettynä telan pinnalle.

Valkoisen kontrastimaalin annettiin hetki kuivua, ja tämän jälkeen maalin päälle suihkutettiin mustaa maalia, joka sisältää erittäin pieniä metallihiukkasia (kuva 28). Samalla vaihtovirralla toimiva magnetointilaite laitettiin metallihiukkasia sisältävään mustaan maaliin.



Kuva 28. Magneettitarkastus mittausta.

Metallihiukkaset (kuva 29) kertyivät kasaan yhdessä kohti akselia, mikä oli merkki siitä, että tässä kohdassa on mahdollisesti jokin epäjatkuvuuskohta akselin pinnassa. Havaintokohtaa tutkittiin myös jatkomittauksissa ultraäänen avulla, mutta epäjatkuvuuskohdasta ei löytynyt mainittavaa vikaa. Tämä oli mahdollisesti vain telan pintakäsittelystä tullut vikakohta akselin pintaan. Muita merkittäviä muutoksia akselin pinnasta ei löytynyt.



Kuva 29. Metallihiukkasia akselin pinnassa.

Ultraäänimittauksessa ultraäänilaitteelle määriteltiin seuraavat asetukset: ultraäänen nopeus=3250 m/s, kappaleen paksuus 1000 mm, kulma  $45^\circ$ , näytön tarkkuus 1000 mm x 1000 mm. Luotaimeksi valittiin  $45^\circ$ -kulmaluotain. Akselin pintaan siveltiin vähän öljyä väliaineeksi, jotta ultraääni voi kulkeutua mitattavaan kappaleeseen. Kulmaluotaimen avulla akselia mitattiin kyljestä (kuva 30), akselin tyypillisestä vikaantumiskohdasta ja akselin alaosassa olevasta levennyksestä (kuva 31).



Kuva 30. Ultraäänimittauksen suunnittelua.

Kulmaluotauksen avulla ei akselistä löytynyt mitään mainittavia epäjatkuvuuskohtia pinnasta eikä sisältä. Kulmaluotain vaatii paljon desibelejä, että ultraääni jaksaisi edetä akselissa. Tähän vaikuttaa olennaisesti akselin haastava muoto ja suuri määrä metallia, joka vaikeuttaa ultraäänen hallittavuutta.

Seuraavaksi vaihdettiin käyttöön normaaliluotain ja samalla muutettiin ultraäänilaitteen asetuksia muutamilta osin. Ultraäänen nopeudeksi vaihdettiin 5930 m/s ja mitattavan kappaleen paksuudeksi 1400 mm. Lisäksi luotaimen kulmaksi muutettiin  $0^\circ$ . Normaaliluotaimen (kuva 31) avulla mitattiin ensin akselin kyljestä samasta kohti kuin kulmaluotaimella.



Normaaliluotain antoi kaiun akselin sisältä 485 mm akselin pinnasta. Tähän tulokseen ei keksitty syytä pikaisesti mietittynä. Lisäksi normaaliluotaimella avulla yritettiin mitata akselia sen päästä, mutta ultraäänilaitteen teho ei riittänyt metriä pitemmälle matkalle. Tämä ongelma voidaan ratkaista ottamalla käyttöön parempi ja tehokkaampi ultraäänilaitte, esimerkiksi Krautkramer USM 35, mitä ei ollut tällä kertaa käytettävissä. Mittaustapahtuman jälkeen akselin peiteltiin hyvin ja jätettiin kaivosvarikon kentälle odottamaan mahdollisia jatkotoimenpiteitä.

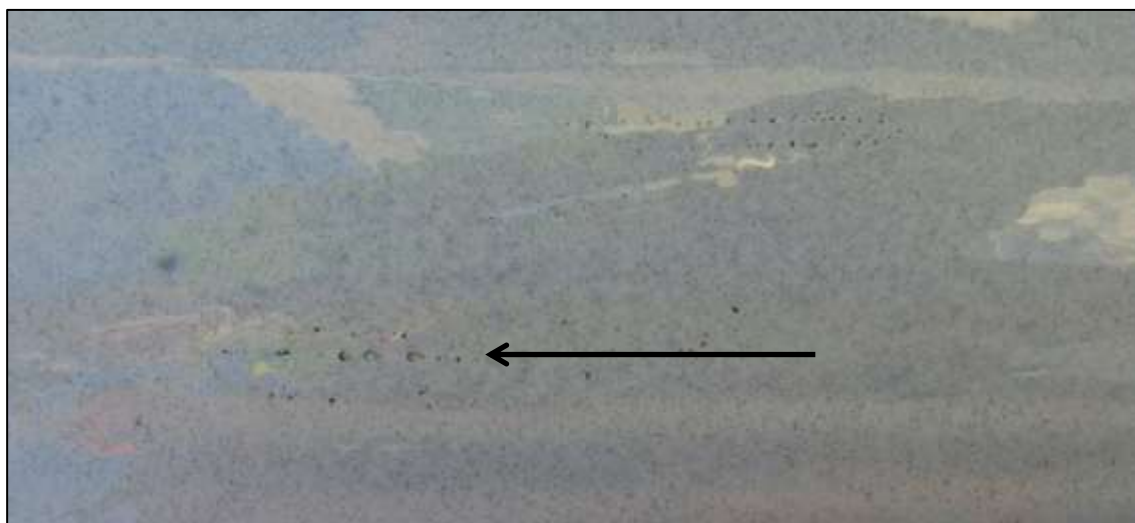


Kuva 31. Ultraäänimittausta normaaliluotaimen avulla.

## 7 MITTAUSTULOKSET

Visuaalisessa tarkastuksessa ei akselistä löytynyt mitään mainittavia epäjatkuvuuskohtia. Jokaiseen NDT-mittaukseen kuuluu olennaisesti ensimmäisenä kohteen visuaalinen tarkastaminen. Näin saadaan heti arvokasta tietoa mitattavan kohteen pinnassa mahdollisesti näkyvistä vioista. Koska epäjatkuvuuskohtia ei näkynyt, niin voitiin edetä seuraavaan mittausvaiheeseen ja -menetelmään.

Magneettisen tarkastusmenetelmän avulla voidaan nopeasti nähdä tarkastettavan materiaalin pinnassa olevat epäjatkuvuuskohdat. Magneettisessa tarkastuksessa akselistä löytyi yksi epäjatkuvuuskohta, johon metallihiukkaset kasaantuivat magneetin vaikutuksesta (kuva 32). Epäjatkuvuuskohta oli mahdollinen pieni särö tai huokoinen kohta akselin pinnassa. Mittausolosuhteiden ollessa epäsuorat tarkkaan mittaukseen ei voida varmaksi tietää vian tarkkaa määrittelmää.



Kuva 32. Magneettijauhekesaumia akselin pinnassa.

Akselin pinta oli jäinen ja kylmä. Pinnan kylmyyden vuoksi maali ei olisi tarttunut akselin pintaan kunnolla, joten akselin pintaa lämmitettiin ensin käsikäyttöisellä nestekaasulämmittimellä. Parhaimmat ja luotettavimmat mittauks tulokset saadaan kun mittausolosuhteet ovat stabiilit. Magneettitarkastusmenetelmä toimii parhaiten olosuhteissa, joissa lämpötila on plussan puolella ja mitattava pinta on kuiva ja puhdistettu. Maalin alle jäävät epäpuhtaudet voivat vaikuttaa mittauks tulokseen, kuten tehdyssä mittauksessa saattoi ulko-olosuhteissa tapahtua.

Ultraäänimittauksessa kulmaluotaimen (kuva 33) avulla ei saatu mainittavia tuloksia aikaan. Tähän vaikuttivat olennaisesti akselin haastava muoto ja mittaolosuhteet. Normaaliluotauksessa saatiin kaiku akselin sisältä 485 mm akselin pinnasta. Kaiku oli todella vahva, ja miettiessä ei saatu varmaa tietoa, mikä tämän kaiun mahdollisesti aiheutti. Kaiku oli todella syväällä akselin sisällä, joten varmuudella ei voitu sanoa, mikä oli kaiun syy.



Kuva 33. Ultraäänimittauksen kaiun näyttämä.

Tarkempien ja varmempien mittaustuloksien saamiseksi täytyy olosuhteiden ja laitteiden olla huippuluokkaa. Ultraäänimittauksen yksi olennaisista asioista on ultraäänilaitteen ja luotaimen kalibrointi mitattavaan kohteeseen. Tässäkin tapauksessa akselin materiaalista pitäisi olla tehty kalibrointikappale, jotta ultraäänilaitteen sisäiset asetukset ja luotain saataisiin määritellyä oikeiksi. Ultraääneen vaikuttaa suuresti mitattavan kappaleen materiaali, joten kalibrointikappale on ehdoton apuväline haluttaessa varmoja mittaustuloksia.

## 8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Karkeamurskaimen akselin mittaaminen ultraäänimenetelmän avulla on erittäin haastavaa akselin vaikean muodon vuoksi. Ultraäänimenetelmä vaatii paljon ennakkovalmisteluja ja tietoja mitattavasta kohteesta. Akselin muodossa olevat erilaiset epäjatkuvuuskohdat aiheuttavat ultraäänimittauksessa vääriä kaikuja, ja tämän takia akselia pitäisiikin mitata useita kertoja. Mittauskertojen ja -historian avulla saataisiin arvokasta tietoa ja kokemusta akselin ultraamisesta, jolloin mittaustuloksista osattaisiin lukea oikein ja nähtäisiin oikeat epäjatkuvuuskohdat.

Karkeamurskaimen akseli on työstetty suuresta metallikappaleesta, joten sen ominaisuudet vaikuttavat oleellisesti ultraäänien etenemiseen akselissa. Tähän voidaan vaikuttaa tekemällä akselin materiaalista kalibrointikappale, jonka avulla ultraäänilaitte kalibroidaan toimimaan oikein kyseiselle materiaalille. Jatkoa ajatellen tulisi selvittää akselin materiaali ja tehdä tiedon avulla tarkoituksenmukainen kalibrointikappale. Tässä tapauksessa sellaista kappaletta ei ollut, joten ultraäänilaitteen kalibrointia ei voitu tehdä. Myös oikeanlainen ultraäänilaitte on merkittävässä asemassa, jotta siinä riittää voimaa ja tehoa suoriutua suuren metallisen esineen ultraamisesta.

Mittaus suoritettiin haastavissa olosuhteissa taivasalla, ja mittaukseen vaikutti olennaisesti kova pakkanen. Kun halutaan absoluuttista tietoa akselin sisältämistä mahdollisista epäjatkuvuuskohdista, täytyy mittaolosuhteiden olla optimaaliset mittaamista varten. Optimaaliset mittaolosuhteet olisivat tasainen lämpötila, suojaisa paikka mittaukseen, tasainen ilmankosteus yms. olosuhteet, jotka voivat mahdollisesti vaikuttaa mittaustuloksiin. Talvivaarassa mitaus voitaisiin suorittaa esimerkiksi primäärimurskaimen läheisyydessä sijaitsevassa korjaamohallissa. Kun mittaolosuhteet ovat kunnossa, voidaan samalla kertaa suorittaa useita NDT-mittauksia. Näin säästettäisiin rahaa ja aikaa. Mitattavan kohteen tarkastamiseen kuuluu olennaisesti käyttää useita eri NDT-menetelmiä. Esimerkiksi ydinvoimaloissa suoritettaviin tarkastuksiin käytetään jopa neljää eri NDT-menetelmää vahvistamaan mittaustuloksia.

Kaikista tärkein asia ultraäänimittauksessa on oikeanlainen ammattitaito tai ammattitaitoinen yritys, joka suorittaa mittauksia. Kuten edellä tuli ilmi, on karkeamurskaimen akselin mittaaminen erittäin haastavaa. Tällöin mittaustulosten virheetön tulkitseminen on avainasemassa, jos käytetään mittaustapana ultraääntä. Tämä on mahdollista käyttämällä luotettavaa ja am-

mattitaitoista yritystä, jolla on koulutetut ja sertifioidut mittaajat ja kokemusta vaikeista ultraamiskohteista, esimerkiksi ydinvoimaloista.

Toinen vaihtoehto on kouluttaa oma mittaaja, joka hallitsee menetelmät ja omaa kokemusta NDT-mittauksista. Laitekustannukset ovat kuitenkin verrattain pienet siihen hyötyyn nähden, mitä mittauksista saa. Jo yhden karkeamurskaimen akselin katkeamisen estäminen maksaa laitteet ja koulutuksen takaisin moninkertaisesti. Tällöin ultraäänimittausta voitaisiin käyttää myös muissa mahdollisissa Talvivaaran kaivososaston kohteissa, esimerkiksi kiviautojen runkojen tai kaivinkoneen puomien tarkastuksessa.

Mittauksen yhteydessä DEKRA Oy:n tarkastajan Petteri Aspgren ehdotti vaihtoehtoa, jossa akseli tarkistettaisiin ensin toisella NDT-menetelmällä kuin ultraäänellä. Hänen ehdottamansa tapa olisi tutkia akseli ensin akselin pintaan levitettävän fluorisoivan nesteen ja ultraviolettivalon avulla. Fluoresoiva neste imeytyy akselissa mahdollisesti oleviin epäjatkuvuuskohtiin. Ultraviolettivalon avulla nähtäisiin heti, millaisia vikoja akselin pinnassa olisi. Menetelmä vaatii kuitenkin pimeän paikan, mutta tämä voidaan toteuttaa helposti esimerkiksi suojapeitteen avulla. Tämän jälkeen voidaan käyttää ultraäänimenetelmää esimerkiksi särön tutkimiseen ja selvittää, kuinka syvälle akseliin särö on edennyt.

Karkeamurskaimen akselin mahdollisesti särkyessä uudestaan voitaisiin rikkoontumistapahtumasta ja akselistä tehdä vaurioanalyysi, jonka avulla voidaan tutkia tarkasti vaurioitumisen syy. Vaurioanalyysin avulla voidaan tutkia, miksi ja miten vaurioituminen on syntynyt. Vaurioanalyysin toteuttamiseen on useita eri vaihtoehtoja, ja se vaatiikin omanlaisensa laitteet toteutuakseen. Vaurioanalyysin avulla saataisiin tutkittua tarkasti, miksi akseli vikaantuu tietyistä kohdista. Tämän avulla voidaan säästää rahaa ja kustannuksia, kun ennaltaehkäistään mahdolliset tulevaisuudessa tapahtuvat akselivauriot ja ennakoimattomat tuotantoseisokit. [11, s. 41–43.]



## 9 YHTEENVETO

Tämä insinöörityö tehtiin osana Devico-projektia, joka tutkii ja kehittää kunnossapidon malleja pienille ja keskisuurille kaivoksille. Insinöörityön tavoitteena oli löytää sopiva ainetta rikkomaton tarkastusmenetelmä, jonka avulla voidaan löytää ja tutkia karkeamurskaimen akselin mahdollisia epäjatkuvuuskohtia.

Tässä insinöörityössä tutustuttiin ainetta rikkomattomiin tarkastusmenetelmiin ja niiden periaatteisiin. Samalla tutustuttiin pääpiirteittäin Talvivaaran kaivoksen tuotantoprosessiin ja -laitteisiin. Lähempää tarkastelua tehtiin ultraäänimenetelmään ja sen avulla suoritettavaan ultraäänitarkastukseen ja -laitteisiin. Talvivaarassa toteutettiin magneettijauhe- ja ultraäänimittaus yhteistyössä DEKRA Oy:n kanssa kaivosvarikon kentällä olevasta karkeamurskaimen akselistä. Insinöörityössä pohdittiin myös sitä, mitä ultraäänimittauksen avulla voitaisiin tehdä tulevaisuudessa Talvivaarassa.

Karkeamurskaimen akselin mittauksessa käytettiin Talvivaaran kaivosvarikon tarvikkeita ja DEKRA Oy:n NDT-mittauslaitteita. Niiden ansioista voitiin toteuttaa karkeamurskaimen akselin mittaustapahtuma Talvivaarassa. Mittaustapahtumasta saatiin arvokasta tietoa, miten ainetta rikkomaton tarkastus etenee ja mitä mittaustapahtuman aikana pitäisi ottaa huomioon, jotta saataisiin tärkeää tietoa mahdollisista epäjatkuvuuskohdista tarkastuskohteissa.

Kokonaisuutena tämä insinöörityö oli mielenkiintoinen kokemus. Insinöörityön edetessä päästiin tutustumaan tekijälle ennalta tuntemattomaan aihealueeseen ja tarkastelemaan siihen liittyviä menetelmiä ja periaatteita, joihin niiden toiminta perustuu. Oli todella palkitsevaa nähdä ja kokea käytännössä, kuinka ammattilainen suorittaa mittauksia ja mitä mittaustuloksista voidaan päätellä.

## LÄHTEET

1. Järviö J, Lehtiö T. Kunnossapito, Tuotanto-omaisuuden hoitaminen. 5. uud. p. ed. Helsinki: KP-Media oy, 2012.
2. Torvi J., Devico-projekti pienten ja keskisuurten kaivosyhtiöiden kunnossapitotarpeisiin. Metall- ja teollisuus-uutiset-lehti nro. 3. 2012. s 43.
3. Devico-projekti. Green Mining - Projektit. [WWW-dokumentti]. <http://www.tekes.fi/ohjelmat/GreenMining/Projektit?id=10674731> (Luettu 12.1.2013.)
4. Talvivaara Kaivososakeyhtiö Oyj. Talvivaara, Etusivu. [WWW-dokumentti]. <http://www.talvivaara.com/etusivu>. (Luettu 11.1.2013.)
5. Talvivaara Kaivososakeyhtiö Oyj. Talvivaaran Vuosikertomus 2011. 2012.
6. Torvi J. Tutustuminen Talvivaaran louhokselle ja karkeamurskaamoon. 17.1.2013.
7. Quarry plant. CRUSHER, Stone Crusher Machine, Quarry Plant, Crusher Equipment Manufacturer, Jaw Crusher, Simmons Cone Crusher, Grinding Mill, Impact Crusher. [WWW-dokumentti]. <http://www.quarryplant.net/>. (Luettu 4.3.2013.)
8. FLSmidth Minerals USA Inc. Gyratory Crusher brochure. (Luettu 29.1.2013.)
9. Talvivaara Kaivososakeyhtiö Oyj. Karkeamurskaamon layout piirustuksesta muokattu. Malmin käsittely, (Luettu 29.1.2013.)
10. FLSmidth karamurskaimen käyttö- ja huolto-ohje/piirustukset. (Luettu 4.2.2013.)
11. Koivisto K. Konetekniikan materiaalioppi. 12. uud. p. ed. Helsinki: Edita; 2008.
12. Tolonen J-P. Selvitys karkeamurskaamon kiinteästä kunnonvalvonnasta. Insinööritoimisto. Kajaanin ammattikorkeakoulu. Kajaani. 2012.
13. Promaint lehti 8. NDT:n historia Suomessa. [WWW-dokumentti]. [http://palvelut.promaint.net/lehti/promaint\\_8\\_2012.html](http://palvelut.promaint.net/lehti/promaint_8_2012.html). (Luettu 9.1.2013.)
14. Järviö J. Kunnossapito. 4. uud. p. ed. Helsinki: KP-Media, 2007.
15. Mikkonen H. Kuntoon perustuva kunnossapito, käsikirja. Helsinki: KP-Media, 2009.

16. Niemi P. Valukappaleen tarkastusmenetelmät. ValuAtlas. [WWW-dokumentti]. <http://www.valuatlas.fi/oppimateriaalit.php>. (Luettu 15.1.2013.)
17. Downes G WM. A brief description of NDT techniques. 2000 - 2003 (Luettu 5.2.2013.)
18. Lempinen V, Jönkkäri I, Järvelä P. Selvitys NDT-menetelmistä. Tampereen teknillinen yliopisto. 2012. (Luettu 9.11.2012.)
19. Altpeter I, Dobmann G, Kröning M, Rabung M, Szielasko S. Micro-magnetic evaluation of micro residual stresses of the 2nd and 3rd order NDT E Int. 2009, 283 s.
20. Heikkinen J. Moodianalyysin perusteet. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Lappeenranta. 2009. (Luettu 7.3.2013.)
21. Olympus. Ultrasonic transducers technical notes. (Luettu 6.2.2013.)
22. Berke M. Ainetta rikkomaton ultraäänitarkastus. 1993.
23. The Hashemite University N. Introduction to Non-Destructive Testing Techniques. (Luettu 6.2.2013.)
24. TeknoNDT Oy. Ultraäänitarkastuslaitteet. [WWW-dokumentti]. [http://teknofinx.com/teknofinxCS3/SONATEST/Dryscan410\\_Esittely.html](http://teknofinx.com/teknofinxCS3/SONATEST/Dryscan410_Esittely.html). (Luettu 15.2.2013.)
25. Sintrol Oy. [WWW-dokumentti]. [http://www.sintrol.com/images/Esitteet/EPOCH\\_1000.pdf](http://www.sintrol.com/images/Esitteet/EPOCH_1000.pdf). (Luettu 15.2.2013.)
26. Inspecta. NDT-testaajat - Inspecta. [WWW-dokumentti]. <http://www.inspecta.com/fi/Palvelut/Sertifiointi/Henkilosertifiointi/NDT-testaajat/>. (Luettu 15.2.2013.)
27. Dekra Industrial Oy. Dekra. [WWW-dokumentti]. <http://www.dekra.fi/etusivu>. (Luettu 20.2.2013.)